



Titre: Influences des caractéristiques physico-chimiques de résidus
miniers sulfureux sur leur réactivité à l'oxygène

Auteur: Richard Toussaint

Date: 2016

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Toussaint, R. (2016). Influences des caractéristiques physico-chimiques de résidus
miniers sulfureux sur leur réactivité à l'oxygène [Mémoire de maîtrise, École
Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/2142/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/2142/>

**Directeurs de
recherche:** Michel Aubertin

Programme: Génie minéral

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DE RÉSIDUS MINIERES
SULFUREUX SUR LEUR RÉACTIVITÉ À L'OXYGÈNE

RICHARD TOUSSAINT

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MINÉRAL)

AVRIL 2016

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DE RÉSIDUS MINIERES
SULFUREUX SUR LEUR RÉACTIVITÉ À L'OXYGÈNE

présenté par : TOUSSAINT Richard

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. CHAPUIS Robert P., D. Sc. A., président

M. AUBERTIN Michel, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. MBONIMPA Mamert, Ph. D., membre

DÉDICACE

In memoria del mio amato maestro, mio padre de cuore, che mi ha insegnato tutto
(À la mémoire de mon maître adoré, mon père de coeur, qui m'a tout enseigné)

À la mémoire de ma tante Annette et de Marco

Pour Noémie, dont la force et le courage m'inspirent et me poussent à la persévérance

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier les partenaires de l'institut de recherche en mines et environnement (IRME).

Je suis extrêmement reconnaissant envers les membres du personnel technique et administratif de Polytechnique Montréal pour leur contribution à ce projet, notamment : Manon Leduc, Étienne Bélanger, Geneviève Fruhauf, Samuel Chénier, Lilia Paquin, Chantal Calafato, Manon Latour, Dominique Pépin, Margareth Mompont, Brigitte Hayeur.

Ma reconnaissance s'adresse également au personnel de l'URSTM-UQAT, notamment pour la réalisation des analyses aux DRX : Hassan Bouzazhah, Patrick Bernèche et Bruno Bussière.

Mes remerciements s'adressent également aux enseignants, collègues et amis de Polytechnique Montréal, qui apportent une atmosphère de travail agréable, plus spécifiquement : Robert Chapuis, Li Li, Michael James, Abtin Jahanbakhshzadeh, Ali Madavi., Vincent Martin, Monica Monzon, Noura El Harrak, Simon Wéber, Coline Taveau, Carlos Contreras, Fernando Medina, Jiang Zheng, Karim Essayad, Gabrielle Boudrias, Louis-Philippe Grimard, Marie-Lin Bréard Lanoix, Dominique Richard, Roselyne Veilleux, Marie-Laure de Boutray (et d'autres que je pourrais oublier).

Je souhaite adresser ma gratitude aux stagiaires de notre laboratoire, qui ont eux aussi contribué à une bonne ambiance de travail notamment : Ghita Drissi Touzani, Galatée Malnoy, Stéphanie Letourneur, Jérôme Boyer, Alexandre Cosentino, Michelle Caron et Jean-Bécket Dalcé.

Je désire exprimer un profond remerciement à ma mère et mes deux frères qui m'ont toujours soutenu dans mes décisions et les moments difficiles, malgré la distance. De même pour mes amis dont trois personnes formidables : Isabelle Lévesque, Thomas Pabst, Noémie Vasset.

J'aimerais exprimer ma gratitude envers Naze Nancy Masalehdani, professeure et amie, qui m'a transmis sa passion pour la géochimie et qui m'a soutenu pendant mon parcours universitaire.

Je tiens à adresser ma gratitude à mon directeur de recherche, Michel Aubertin, pour sa disponibilité, sa compréhension, sa patience, son écoute et ses nombreux conseils qui m'ont permis d'améliorer beaucoup de compétences et qui me poussent à l'excellence.

Enfin, je remercie du fond du cœur Charlotte qui est un soutien indispensable et bénéfique, un pilier sur lequel j'ai pu m'appuyer dans la réalisation de ma maîtrise et dans ma vie.

RÉSUMÉ

L'activité minière est la source de nombreux enjeux environnementaux. La production de drainage minier acide (DMA) constitue une de ces préoccupations et elle représente un axe de recherche important pour divers projets d'ingénierie. Les résidus miniers sulfureux produisant du DMA sont au cœur de ce mémoire. Leur réactivité est principalement causée par le contact entre les minéraux sulfureux, l'eau et l'oxygène de l'air. Les méthodes de prévention ciblent l'une de ces trois composantes. Il est important de bien connaître les caractéristiques minéralogiques, géotechniques et hydrogéologiques de ces rejets de concentrateur pour mieux planifier l'application des méthodes de contrôle préconisées. Le taux de réaction des résidus est étudié ici puisqu'il affecte directement le flux d'oxygène consommé par les matériaux sulfureux et la quantité d'acide produite. Évaluer ce paramètre est essentiel à la mise en place des techniques de prévention basées sur des études géochimiques.

L'étude présentée dans ce mémoire vise à évaluer l'influence des principales caractéristiques physico-chimiques des résidus miniers sur leur réactivité à l'oxygène. Pour cela, une étude expérimentale a été menée sur des résidus provenant de deux sites miniers situés en Abitibi (Goldex et Manitou). Des mélanges entre ces résidus ont aussi été préparés, afin d'obtenir des séries d'échantillons présentant une variation systématique d'un seul paramètre à la fois, sur la base des caractéristiques granulométriques, minéralogiques et hydrogéologiques. Des essais granulométriques, hydrogéologiques et minéralogiques ont été réalisés sur chaque série de mélanges. Les valeurs du coefficient de diffusion D_e et du taux de réaction à l'oxygène K_r ont été mesurées en laboratoire. Ces résultats d'essais sont interprétés à l'aide de codes numériques, sur la base des lois de Fick afin d'estimer les valeurs de D_e et K_r . Ces valeurs expérimentales sont ensuite comparées à des valeurs prédites à partir de modèles analytiques. Les résultats pour les valeurs de D_e sont satisfaisants. Ceux pour la valeur du coefficient K_r mettent en évidence une surestimation du modèle prédictif. Une correction du modèle est proposée par l'ajustement de la valeur de réactivité intrinsèque, qui semble varier d'un résidu à l'autre.

Certains essais de caractérisation ont aussi été réalisés avant et après les essais de consommation d'oxygène, afin d'évaluer s'il y a modification de certains paramètres dans le temps, suite aux essais. Ces résultats semblent montrer que les valeurs de la teneur en pyrite et de la densité des grains solides tendent à diminuer pendant ces essais.

L'étude comporte aussi une estimation de l'effet de l'incertitude sur l'interprétation des résultats des essais de consommation et de diffusion de l'oxygène. Cette incertitude est surtout reliée à la précision limitée des mesures du volume (hauteur) des éprouvettes soumises aux essais. Les résultats montrent que ces écarts peuvent quelques fois engendrer une incertitude importante sur le degré de saturation. Cela engendre une incertitude sur le coefficient de diffusion (pour les essais de consommation d'oxygène) pouvant être élevée. L'impact sur le paramètre K_r est cependant limité.

Des résultats issus d'essais menés lors de travaux précédents (antérieurs à ce mémoire) sont également repris et analysés afin de valider les résultats obtenus ici. Les résultats concordent généralement assez bien avec ceux obtenus des travaux réalisés pour ce projet.

ABSTRACT

Mining activity can be the source of various environmental concerns. In this regard, acid mine drainage (AMD) is one of the most important issues. Many researchers have worked on this subject to help improve our understanding. Special attention has been paid to the behavior of sulfidic tailings producing AMD. Such tailings can react in an oxidative system in the presence of water. Different techniques have been developed to deal with AMD, including prevention methods aimed at limiting the availability of one of the reagents (water, air, or sulfide minerals). Planning for prevention or management methods requires the knowledge of mineralogical, geotechnical and hydrogeological characteristics of the tailings. The oxidative reactivity is a particularly important aspect to assess AMD. The determination of the corresponding properties is essential for the analysis of control methods that required geochemical investigations.

This Master thesis aims at an improving our understanding of the relationship between the oxidative reactivity of sulfidic tailings and their physico-chemical properties. Tailings from the Manitou and Goldex mine sites have been used in this research project. Different samples were combined to produce tailings mixtures. Each series was prepared to isolate the effect of one parameter in order to study its influence on tailings reactivity. Grain size distribution, hydrogeological and mineralogical parameters were determined for each mixture series. The effective diffusion coefficient (D_e) and reaction rate coefficient (K_r) were also measured using specific testing procedures. The results from these tests were back-analyzed using numerical simulations to obtain the values of D_e and K_r by solving Fick's laws. The experimental values are compared with those given by predictive models. The results are very good for D_e , but those obtained for K_r indicate that the predictive equation often tends to overestimate the measured value. A correction of this model is suggested by modifying the intrinsic reactivity parameter used in the predictive equation.

Tailings were also characterized before and after the oxidation tests, to analyze the temporal evolution of their characteristics. The results indicate that the pyrite content and relative density of the grains often decrease with time during these tests.

An analysis of the uncertainty was also performed for the oxygen diffusion and oxidative reaction tests, based on volumetric measurements. Results show that the variability of the size measurements can lead to a relatively important uncertainty for the degree of saturation. This in

turn affects the uncertainty for the D_e value, which can be quite high. The impact on the K_r value is however much more limited.

Previously performed tests (conducted by others) were also analyzed to validate the results; the tendencies observed for these other results are fairly similar to the ones obtained in this experimental study.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES	XVIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XXV
LISTE DES ANNEXES	XXX
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Généralités.....	1
1.2 Résidus miniers réactifs	2
1.3 Présentation du projet de recherche et contenu du mémoire.....	2
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	5
2.1 Le drainage minier acide	5
2.1.1 Formation	5
2.1.2 Facteurs qui influencent la production du DMA.....	6
2.1.3 Prévention du DMA	10
2.2 Propriétés hydrogéologiques des milieux saturé et non saturé	12
2.2.1 Domaine saturé.....	12
2.2.2 Domaine non saturé.....	15
2.2.3 Courbe de rétention d'eau	16
2.2.4 Conductivité hydraulique non saturée.....	19

2.3	Diffusion et consommation de l'oxygène	20
2.3.1	Généralités.....	20
2.3.2	Diffusion.....	22
2.3.3	Consommation	23
2.3.4	Facteurs d'influence	24
2.3.5	Évolution de la taille des grains de pyrite selon le modèle du noyau réactif	28
2.4	Modélisation numérique.....	30
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE : MATÉRIAUX ET PROCÉDURES EXPERIMENTALES.....		32
3.1	Matériaux	32
3.1.1	Matériaux testés.....	32
3.1.2	Matériaux des études antérieures	33
3.2	Préparation des échantillons.....	33
3.2.1	Homogénéisation et préparation des mélanges	33
3.3	Procédures expérimentales.....	37
3.3.1	Détermination des paramètres physiques de base	37
3.3.2	Détermination des caractéristiques hydrogéologiques.....	39
3.3.3	Détermination des caractéristiques chimiques et minéralogiques.....	42
3.3.4	Essais de diffusion de l'oxygène.....	42
3.3.5	Essais de consommation de l'oxygène.....	43
3.3.6	Construction des modèles numériques.....	45
3.3.7	Évaluation des incertitudes.....	49
CHAPITRE 4 PRINCIPAUX RÉSULTATS		51
4.1	Caractérisation physique de base	51
4.1.1	Granulométrie.....	51

4.1.2	Densité relative des grains solides	59
4.1.3	Essai de compactage.....	62
4.2	Caractérisation hydrogéologique.....	62
4.2.1	Conductivité hydraulique saturée.....	62
4.2.2	Courbes de rétention d'eau.....	65
4.3	Caractérisation géochimique et minéralogique	67
4.3.1	Teneur en soufre et en carbone	67
4.3.2	Minéralogie	70
4.3.3	Potentiel de génération d'acide	76
4.4	Essais de diffusion de l'oxygène.....	78
4.5	Essais de consommation de l'oxygène.....	82
CHAPITRE 5 ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS.....		99
5.1	Évaluation des incertitudes sur les résultats d'essais	99
5.1.1	Essais de diffusion de l'oxygène.....	99
5.1.2	Essais de consommation de l'oxygène.....	103
5.2	Ajustement de la valeur de la réactivité intrinsèque K'	114
5.2.1	Résultats pour les résidus MNO et MO	115
5.2.2	Résultats d'autres essais	119
5.3	Évolution de la réactivité dans le temps.....	124
5.3.1	Principaux résultats et incertitudes.....	125
5.3.2	Lien entre densité relative D_r et teneur en pyrite C_p	130
5.3.3	Évolution de la teneur en pyrite dans le temps.....	134
5.4	Synthèse et dernières remarques	136
CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		139

6.1	Conclusion.....	139
6.2	Recommandations	140
BIBLIOGRAPHIE		142

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Récapitulatif des caractéristiques des mélanges des séries 1 à 5, avec les objectifs visés.	36
Tableau 3.2 : Valeurs des paramètres utilisés pour le modèle qui simule les essais de diffusion de l'oxygène avec le logiciel POLLUTE (de Rowe et al., 1994)	46
Tableau 3.3 : Résumé des étapes de calculs et des conditions frontières imposées pour simuler les essais de diffusion et consommation d'oxygène avec le code Vadose/W (Geostudio, GoSlope Inc. ; version 7.2.1, 2007) ; la température est constante (20°C) pour ces essais. ...	48
Tableau 4.1 : Principales caractéristiques granulométriques des résidus et des mélanges (séries 1 à 4).....	55
Tableau 4.2 : Valeurs des surfaces spécifiques S_s des divers résidus et mélanges, calculées selon les modèles décrits à la section 2.3.4, pour un coefficient de forme $\alpha = 6$	57
Tableau 4.3 : Valeurs de la densité relative des grains solides (D_r) des divers résidus et mélanges	60
Tableau 4.4 : Valeurs de la densité relative des grains solides (D_r) des résidus MO, MNO et du mélange MNOfin mesurées en décembre 2015.	61
Tableau 4.5 : Résumé des résultats de l'essai de compactage sur deux résidus miniers.	62
Tableau 4.6 : Résultats des essais triaxiaux sur les résidus MNO et Gx.....	63
Tableau 4.7 : Paramètres calculés par le logiciel RETC pour établir les CRE lissées des résidus Gx et MNO, à partir des données expérimentales et le modèle van Genuchten (1980) (équ. 2.25 et 2.26).....	65
Tableau 4.8 : Valeurs des AEV mesurées et estimées avec la méthode des tangentes et prédite par le modèle MK.....	66
Tableau 4.9 : Résultats des analyses LECO avant et après les essais de consommation d'oxygène	69
Tableau 4.10 : Minéralogie quantitative (% massique) selon les résultats des mesures au DRX pour les résidus MNO, MO et Gx	71

Tableau 4.11 : Minéralogie quantitative (% massique) selon les résultats des mesures au DRX pour les échantillons MNO28, MNO50, MNO73 (série 1).....	72
Tableau 4.12 : Minéralogie quantitative (% massique) selon les résultats des mesures au DRX pour les échantillons MNOfin, MNOmoy, MNOgros (série 2)	72
Tableau 4.13 : Minéralogie quantitative (% massique) selon les résultats des mesures au DRX pour les échantillons MNOfin égalisé, MNOmoy égalisé (série 3)	73
Tableau 4.14 Minéralogie quantitative (% massique) selon les résultats des mesures au DRX pour les échantillons MNOfin-Gxfin, MNOfin-Gxmoy, MNOfin-Gxgros (série 4)	73
Tableau 4.15 : Teneurs en pyrite des résidus et mélanges (séries 1 à 4) selon les analyses DRX, avant et après les essais de consommation d'oxygène.	75
Tableau 4.16 : Résultats des analyses statiques selon la méthode de Lawrence et Wang (1997) avec les valeurs de PA, PNC, PNCN et PNC/PA (voir définitions à la section 2.1.3)	77
Tableau 4.17 : Résumé des caractéristiques et résultats des essais de diffusion d'oxygène sur les résidus et mélanges; les valeurs marquées d'un * représentent les cas où il y a un écart important (facteur > 10) entre les valeurs du coefficient de diffusion D_e prédites et ajustées.	80
Tableau 4.18 : Conditions des essais de consommation d'oxygène et caractéristiques (K_r et D_e) prédites par le modèle de Collin (1987, éq. 2.51) et celui de Aachib et al. (2004; éq. 2.45) et celles obtenues par ajustement des résultats expérimentaux avec POLLUTE et Vadose/W, pour les échantillons de la série 1.....	85
Tableau 4.19 : Conditions des essais de consommation d'oxygène et caractéristiques (K_r et D_e) prédites par le modèle de Collin (éq. 2.51) et celui de Aachib et al. (2004 ; éq. 2.45) et celles obtenues par ajustement des résultats expérimentaux avec POLLUTE et Vadose/W, pour les échantillons de la série 2.....	88
Tableau 4.20 : Conditions des essais de consommation d'oxygène et caractéristiques (K_r et D_e) prédites par le modèle de Collin (1987, éq. 2.51) et celui de Aachib et al. (2004 ; éq. 2.45) et celles obtenues par ajustement des résultats expérimentaux avec POLLUTE et Vadose/W, pour les échantillons de la série 3.....	91

Tableau 4.21 : Conditions des essais de consommation d'oxygène et caractéristiques (K_r et D_e) prédites par le modèle de Collin (1987, éq. 2.51) et celui de Aachib et al. (2004 ; éq. 2.45) et celles obtenues par ajustement des résultats expérimentaux avec POLLUTE et Vadose/W, pour les échantillons de la série 4.....	94
Tableau 4.22 : Conditions des essais de consommation d'oxygène et caractéristiques (K_r et D_e) prédites par le modèle de Collin (éq. 2.51) et celui de Aachib et al. (2004 ; éq. 2.45) et celles obtenues par ajustement des résultats expérimentaux avec POLLUTE et Vadose/W, pour les échantillons MNO de la série 5.	96
Tableau 4.23 : Conditions des essais de consommation d'oxygène et caractéristiques (K_r et D_e) prédites par le modèle de Collin (éq. 2.51) et celui de Aachib et al. (2004 ; éq. 2.45) et celles obtenues par ajustement des résultats expérimentaux avec POLLUTE et Vadose/W, pour les échantillons MO de la série 5.	98
Tableau 5.1 : Valeurs des épaisseurs moyenne et maximale mesurées suite aux essais de diffusion et valeurs des écarts relatifs des épaisseurs des résidus.	100
Tableau 5.2 : Caractéristiques physiques et coefficient de diffusion D_e déterminés à partir des mesures des épaisseurs minimale et maximale des résidus soumis aux essais de diffusion de l'oxygène.	101
Tableau 5.3 : Caractéristiques physiques et valeurs des coefficients de diffusion D_e et du taux de réaction K_r des résidus déduites suite aux essais de consommation d'oxygène; valeurs obtenues à partir des épaisseurs minimale et maximale des éprouvettes	106
Tableau 5.4 : Valeurs du coefficient du taux de réaction K_r prédites et obtenues à partir des données expérimentales (épaisseurs minimales, maximales et moyennes) pour chaque échantillon, suite aux essais de consommation d'oxygène (voir aussi exemple de calcul à l'annexe I).	110
Tableau 5.5 : Valeurs de la réactivité intrinsèque K' calculée à partir de l'équation 5.1 pour chaque échantillon et valeur moyenne de K' par série d'échantillons.	115
Tableau 5.6 : Valeurs de la réactivité intrinsèque moyenne K' ($m^3 O_2.m^{-2} \text{ pyrite.an}^{-1}$) par série d'échantillons et valeurs des coefficients du taux de réaction K_r prédites de ces valeurs ; On	

montre également les valeurs de K_r prédites selon le modèle de Collin (avec $K' = 0,015 \text{ m}^3 \text{ O}_2 \cdot \text{m}^{-2} \text{ pyrite} \cdot \text{an}^{-1}$) et mesurées expérimentalement.	118
Tableau 5.7 : Valeurs de la réactivité intrinsèque K' calculée à partir de l'équation 5.1 pour chaque échantillon et valeur moyenne de K' par série d'échantillons, selon les résultats expérimentaux de Martin (2005), Gosselin (2007), Ouangrawa (2007) et Pabst (2011).	120
Tableau 5.8 : Valeurs de la réactivité intrinsèque K' moyen et des corrections des valeurs du modèle de Collin pour les essais réalisés par Martin (2005), Gosselin (2007), Ouangrawa (2007) et Pabst (2011)	122
Tableau 5.9 : Valeurs de teneur en soufre %S obtenues à la fournaise LECO avant et après les essais de consommation de l'oxygène, avec les plages de mesures.....	126
Tableau 5.10 : Valeurs de teneur en pyrite C_p obtenues au DRX avant et après les essais de consommation de l'oxygène avec la plage des mesures pour les échantillons de résidus testés.	127
Tableau 5.11 : Valeurs de la densité relative des grains solides D_r avant et après les essais de consommation de l'oxygène, avec la plage des valeurs mesurées sur les échantillons de résidus testés.....	129
Tableau 5.12 : Caractéristiques de divers résidus mesurées par Monzon (1998), Martin (2005), Gosselin (2007), Ouangrawa (2007) et Pabst (2011).	133
Tableau 5.13 : Valeurs des densités relatives des grains solides avant et après essais de consommation D_{ri} et D_{rf} et des teneurs en pyrites C_{pi} et C_{pf} déduites de ces valeurs et de l'équation 5.4 pour les échantillons testés; on montre aussi les valeurs de perte en pyrite en fonction du temps ($\Delta C_p / \Delta t$).	135
Tableau K.1 : Valeurs des coefficient du taux de réaction normalisé $(K_r)_{C_p}$ (équ. K.1) selon la teneur en pyrite C_p pour l'ensemble des séries d'essais.....	214
Tableau K.2 : Valeurs des coefficients du taux de réaction normalisé $(K_r)_{C_p}$ (équ. K.1) selon la teneur en pyrite C_p prédits et mesurés, pour l'ensemble des séries d'essais antérieurs (données tirées de Gosselin, 2007). On montre aussi les moyennes des taux de réaction normalisés pour chaque résidu.	217

Tableau K.3 : Valeurs des coefficients du taux de réaction normalisé $(K_r)_{DH}$ (éq. K.2) prédits et mesurés selon le diamètre équivalent D_H et de la surface spécifique déduite de la méthode de Chapuis et Légaré (1992), pour l'ensemble des séries d'essais.	219
Tableau K.4 : Valeurs des coefficients du taux de réaction normalisé $(K_r)_{DH}$ (éq. K.2) prédites et mesurées en fonction du diamètre équivalent D_H , pour l'ensemble des séries d'essais antérieurs réalisés par Gosselin (2007). On montre aussi les moyennes des taux de réaction normalisés par résidu.	222

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Schéma des étapes réactionnelles de la formation d'un DMA (d'après Stumm et Morgan, 1981, repris par Aubertin et al., 2002).....	6
Figure 2.2 : Diagramme Eh-pH du fer (tiré de Lemos et al., 2007).....	9
Figure 2.3 : CRE pour trois sols de granulométries différentes (tiré de Delage et Cui, 2000)	17
Figure 2.4 : Schématisation de la CRE et de la fonction de perméabilité d'un sable et d'un silt (Aubertin et al., 1995, 2002)	20
Figure 2.5 : Valeurs du taux de réaction K_r mesurées et prédites avec le modèle de Collin (1987) (équ. 2.51) modifié; les données expérimentales sont aussi montrées (tiré de Gosselin, 2007).	26
Figure 2.6 : Schéma représentant la cinétique de réaction (dissolution) d'une particule solide dans un fluide (adapté de Safari et al., 2009)	29
Figure 3.1 : Schéma d'une cellule triaxiale (Martin, 2004).	40
Figure 3.2 : schéma d'une cellule TEMPE, Martin, 2004.....	41
Figure 3.3 : Représentation schématique d'une cellule de diffusion (Aubertin et Mbonimpa, 1999; Mbonimpa et al., 2012)	43
Figure 3.4 : Photos de l'ensemble du montage des essais de consommation et diffusion, (Toussaint, 2010).....	45
Figure 4.1 : Courbes granulométriques des échantillons de résidus Manitou non oxydé (MNO), Manitou oxydé (MO) et Goldex (tableau 4.1).....	53
Figure 4.2 : Courbes granulométriques des mélanges de la série 1 (i.e. MNO28, MNO50, MNO73 ; tableau 4.1) utilisés pour évaluer l'effet de la teneur en pyrite.....	53
Figure 4.3 : Courbes granulométriques des mélanges de résidus de la série 2 (MNOfin, MNOMoy, MNOgros ;tableau 4.1) utilisés pour évaluer l'effet du diamètre équivalent.	54
Figure 4.4 : Courbes granulométriques des mélanges de résidus de la série 3 (MNOfin égalisé, MNOMoy égalisé, MNOgros ; tableau 4.1) utilisés pour évaluer l'effet du diamètre équivalent.	54

Figure 4.5 : Courbes granulométriques des mélanges de résidus de la série 4 (MNOfin Gxfin, MNOfin Gxmoy, MNOfin Gxgros ; tableau 4.1) utilisés pour évaluer l'effet du diamètre équivalent.	55
Figure 4.6 : Valeurs des Surfaces spécifiques S_s évaluées selon l'approche de Chapuis et Légaré (1992) et par les méthodes MK et KCM, pour un coefficient de forme $\alpha = 6$ (voir tableau 4.2).....	59
Figure 4.7 : Comparaison des valeurs de la densité relative des grains solides (D_r) avant et après les essais de consommation d'oxygène sur les divers résidus et mélanges (voir détails au tableau 4.3).	61
Figure 4.8 : Valeurs de k_{sat} mesurée (moyenne) et obtenues des modèles prédictifs KC et KCM pour le résidu Gx, en fonction de l'indice des vides e	64
Figure 4.9 : Valeurs de k_{sat} mesurée (moyenne) et obtenues des modèles prédictifs KC et KCM pour le résidu MNO, en fonction de l'indice des vides e	64
Figure 4.10 : Valeurs expérimentales de la TEV en fonction de la succion ψ , CRE lissée (RETC) et prédite (MK) pour le résidu Gx	66
Figure 4.11 : Valeurs expérimentales de la TEV en fonction de la succion ψ , CRE lissée (RETC) et prédite (MK) pour le résidu MNO	67
Figure 4.12 : Teneurs en soufre avant et après les essais de consommation de l'oxygène (mesures à la fournaise LECO; voir tableau 4.9)	70
Figure 4.13 : Teneur en pyrite (C_p) des résidus et mélanges avant et après les essais de consommation d'oxygène (voir tableau 4.15).....	75
Figure 4.14 : Teneur en pyrite (C_p) et en soufre (%S) des divers résidus et mélanges avant et après les essais de consommation d'oxygène (voir tableaux 4.9 et 4.15) ; on montre aussi la droite représentant la teneur en pyrite en fonction de la teneur en soufre total, en supposant que le soufre n'est présent que sous forme de pyrite (voir équation 4.1).	76
Figure 4.15 : Valeurs de PNC et PA des échantillons et relations graphiques pour la détermination du potentiel de génération de DMA, selon la valeur de PA/PNC (basé sur les bornes présentées par Villeneuve (2004).	78

- Figure 4.16 : Résultat de l'essai de diffusion de l'oxygène mené sur l'échantillon MNO avec un degré de saturation (S_r) de 0.92; le graphique montre la décroissance de la concentration en oxygène dans le réservoir supérieur (source) et l'augmentation dans le réservoir inférieur (récepteur).79
- Figure 4.17 : Valeurs des coefficients de diffusion D_e obtenus expérimentalement suite aux essais de diffusion de l'oxygène et ceux prédits par le modèle de Aachib et al. (2004), pour des valeurs de porosité limites (porosités minimale et maximale pour l'ensemble des échantillons testés et ne présentant aucun écart important entre prédiction et mesure), en fonction du degré de saturation S_r 81
- Figure 4.18 : Résultats de l'essai de consommation de l'oxygène sur le résidu MNO28 ($S_r = 36\%$; valeurs déduites de $D_e = 54 \text{ m}^2.\text{an}^{-1}$ et $K_r = 175.\text{an}^{-1}$) et valeurs de la concentration d'oxygène obtenues des simulations réalisées avec POLLUTE et Vadose/W83
- Figure 4.19 : Courbes expérimentales de la concentration d'oxygène dans le temps mesurés durant les essais de consommation d'oxygène menés sur les mélanges de résidus de la série 1 ; on montre aussi les valeurs obtenues par simulation numérique à l'aide des logiciels POLLUTE et Vadose/W (voir tableau 4.18).84
- Figure 4.20 : Valeurs du coefficient du taux de réaction K_r (en fonction de la teneur en pyrite C_p) obtenues des données expérimentales interprétées avec POLLUTE et Vadose/W, et celles prédites avec le modèle de Collin (éq. 2.51; lignes en traits pleins), pour les échantillons de la série 1 (tableau 4.18).86
- Figure 4.21 : Courbes expérimentales de la concentration d'oxygène dans le temps mesurés durant les essais de consommation d'oxygène menés sur les mélanges de résidus de la série 2 ; on montre aussi les valeurs obtenues par simulation numérique à l'aide des logiciels POLLUTE et Vadose/W (tableau 4.19).87
- Figure 4.22 : Valeurs du coefficient du taux de réaction K_r en fonction du diamètre équivalent D_H (éq. 2.50) obtenues des données expérimentales interprétées avec POLLUTE et Vadose/W et celles prédites avec le modèle de Collin (éq. 2.51, aussi montrées par la courbe), pour les échantillons de la série 2 (tableau 4.19).89

- Figure 4.23 : Courbes expérimentales de la concentration mesurée d'oxygène dans le temps durant les essais de consommation d'oxygène menés sur les mélanges de résidus de la série 3 ; on montre aussi les valeurs obtenues par simulation numérique à l'aide des logiciels POLLUTE et Vadose/W (voir tableau 4.20).....90
- Figure 4.24 : Valeurs du coefficient du taux de réaction K_r en fonction du diamètre équivalent D_H (équ. 2.50) obtenues des données expérimentales interprétées avec POLLUTE et Vadose/W et celles prédites avec le modèle de Collin (équ. 2.51, aussi montrées par la courbe), pour les échantillons de la série 3 (tableau 4.20).92
- Figure 4.25 : Courbes expérimentales de la concentration d'oxygène dans le temps mesurée durant les essais de consommation d'oxygène menés sur les mélanges de résidus de la série 4 ; on montre aussi les valeurs obtenues par simulation numérique à l'aide des logiciels POLLUTE et Vadose/W (voir tableau 4.21).....93
- Figure 4.26 : Valeurs du coefficient du taux de réaction K_r en fonction du diamètre équivalent D_H (équ. 2.50) obtenues des données expérimentales interprétées avec POLLUTE et Vadose/W et celles prédites avec le modèle de Collin (équ. 2.51, aussi montrées par la courbe), pour les échantillons de la série 4 (tableau 4.21).94
- Figure 4.27 : Courbes expérimentales de la concentration d'oxygène dans le temps mesurée durant les essais de consommation d'oxygène menés sur les mélanges de résidu MNO de la série 5 ; on montre aussi les valeurs obtenues par simulation numérique à l'aide des logiciels POLLUTE et Vadose/W. (voir tableau 4.22).....95
- Figure 4.28 : Courbes expérimentales de la concentration d'oxygène dans le temps mesurée durant les essais de consommation d'oxygène menés sur les mélanges de résidu MO de la série 5 ; on montre aussi les valeurs obtenues par simulation numérique à l'aide des logiciels POLLUTE et Vadose/W (voir tableau 4.23).....97
- Figure 4.29 : Valeurs des coefficients de diffusion D_e (en fonction du degré de saturation) obtenues expérimentalement suite aux essais de consommation de l'oxygène et ceux prédits par le modèle de Aachib et al. (2004) pour deux valeurs de porosité n98
- Figure 5.1 : Valeurs du coefficient de diffusion en fonction du degré de saturation obtenues expérimentalement suite aux essais de diffusion de l'oxygène et ceux prédits par le modèle

de Aachib et al. (2004); on montre aussi la plage d'incertitude (variation selon les mesures) sur le degré de saturation (S_r) (voir tableau 5.2 et détails de calculs à l'annexe G)..... 102

Figure 5.2 : Valeurs du coefficient de diffusion obtenues suite aux essais de consommation de l'oxygène et ceux prédits par le modèle de Aachib et al. (2004); on montre aussi la plage d'incertitude sur le degré de saturation (S_r) ainsi que celle sur le coefficient de diffusion D_e prédit (voir tableau 5.3)..... 107

Figure 5.3 : Valeurs du coefficient du taux de réaction K_r minimum et maximum obtenues des essais de consommation de l'oxygène selon les épaisseurs minimales et maximales des éprouvettes ; ces valeurs sont présentées selon un ordre croissant du degré de saturation S_r (tableau 5.3)..... 108

Figure 5.4 : Valeurs du coefficient du taux de réaction K_r minimum et maximum obtenues des essais de consommation de l'oxygène selon les épaisseurs minimales et maximales des éprouvettes; les valeurs prédites par le modèle de Collin (1987) sont également présentées (tableau 5.3)..... 108

Figure 5.5 : Valeurs du coefficient du taux de réaction K_r obtenues suite aux essais de consommation de l'oxygène et celles prédites par le modèle de Collin (1987) en fonction du degré de saturation S_r , pour le résidu MNO50 ; on montre aussi la plage d'incertitude pour les paramètres S_r et K_r (voir tableau 5.4 et détails à l'annexe I). 111

Figure 5.6 : Valeurs du coefficient du taux de réaction K_r obtenues suite aux essais de consommation de l'oxygène et celles prédites par le modèle de Collin (1987) en fonction de la teneur en pyrite C_p pour les résidus de la série 1 ; on montre aussi la plage d'incertitude obtenue pour les paramètres C_p et K_r . (détail des calculs à l'annexe I). 112

Figure 5.7 : Valeurs des coefficients du taux de réaction K_r obtenues suite aux essais de consommation de l'oxygène et celles prédites par le modèle de Collin (1987) en fonction du diamètre équivalent D_H pour les résidus des séries 2, 3 et 4 ; on montre aussi la plage d'incertitude obtenue pour le paramètre K_r (voir le détail des calculs à l'annexe J). 113

Figure 5.8 : Valeurs individuelles (batonnets) et moyennes (traits horizontaux) de K' obtenues selon l'équation 5.1 pour l'ensemble des échantillons testés ; on montre aussi la valeur de K' adoptée par Collin (1987) (voir tableau 5.5)..... 117

- Figure 5.9 : Valeurs du coefficient du taux de réaction K_r prédites en fonction du taux de réaction K_r obtenues expérimentalement pour les résidus et mélanges ; on montre les valeurs de K_r prédites selon le modèle de Collin avec la valeur K' de référence et celles avec la valeur moyenne de K' par série d'échantillons (voir tableau 5.6) 119
- Figure 5.10 : Valeurs individuelles (batonnets) et moyennes (traits horizontaux) de K' obtenues selon l'équation 5.1 pour les essais réalisés par Martin (2005), Gosselin (2007), Ouangrawa (2007) et Pabst (2011) ; on montre aussi la valeur de K' ($0.015 \text{ m}^3 \text{ O}_2 \cdot \text{m}^{-2} \text{ pyrite} \cdot \text{an}^{-1}$) adoptée par Collin (1987) (voir détails au tableau 5.7). 121
- Figure 5.11 : Valeurs du coefficient du taux de réaction K_r prédites en fonction du taux de réaction K_r obtenu expérimentalement pour les essais réalisés par Martin (2005), Gosselin (2007), Ouangrawa (2007) et Pabst (2011) ; on montre les valeurs de K_r prédites selon le modèle de Collin avec la valeur K' de référence et celles avec la valeur moyenne de K' par série d'échantillons (voir tableau 5.8) 123
- Figure 5.12 : Valeurs prédites du coefficient du taux de réaction K_r en fonction du taux de réaction K_r obtenue expérimentalement pour les essais réalisés par Martin (2005), Gosselin (2007), Ouangrawa (2007) et Pabst (2011) ; on montre les valeurs de K_r prédites selon le modèle de Collin 1987) avec la valeur K' de référence et celles avec la valeur moyenne de K' par série d'échantillons. Les résultats obtenus sur échantillons présentant une valeur de $S_r > 85\%$ ne sont pas inclus ici (voir tableau 5.8). 124
- Figure 5.13 : Teneurs en soufre obtenues à la fournaise LÉCO avant et après les essais de consommation d'oxygène, avec les plages d'incertitude autour des valeurs moyennes (voir tableau 5.9) 126
- Figure 5.14 : Teneurs en pyrite C_p obtenues au DRX avant et après les essais de consommation d'oxygène, avec les valeurs moyennes et les valeurs extrêmes mesurées (voir tableau 5.10) 128
- Figure 5.15 : Densités relative des grains solides D_r avant et après les essais de consommation d'oxygène, avec les valeurs moyennes et la plage d'incertitude associée. 130

Figure 5.16 : Relation entre la teneur en pyrite C_p et la teneur en soufre %S avant les essais de consommation d'oxygène; on montre aussi la droite théorique lorsque l'on suppose que la totalité du soufre provient de la pyrite (éq. 5.2 ; données tirées des tableaux 4.9 et 4.15) .131

Figure 5.17 : Densité relative des grains solides D_r en fonction de la teneur en soufre (%S) et de la teneur en pyrite C_p avant les essais de consommation d'oxygène (selon les données tirées des tableaux 4.3, 4.9 et 4.15).....131

Figure 5.18 : Comparaison entre la relation prédite entre C_p et D_r (éq. 5.4), et les résultats expérimentaux incluant ceux d'essais précédents (données tirées des tableaux et 4.3, 4.15 et 5.15).....133

Figure 5.19 : Relation entre la perte en pyrite dans le temps $\Delta C_p / \Delta t$ (basée sur la variation de D_r) et le diamètre équivalent des grains de résidus D_H 135

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

%C	Teneur en Carbone (%)
%S	Teneur en soufre (%)
a_c	Coefficient d'adhésion (-)
AEV (Ψ_a)	Air entry value ou valeur (pression) d'entrée d'air ($M.T^{-2}.L^{-1}$)
ASTM	American Society for Testing and Materials
BNQ	Bureau de normalisation du Québec
Buly	Mine de Bulyanhulu
C	Concentration ($M.L^{-3}$)
C_a	Concentration à l'équilibre de l'oxygène dans l'air ($M.L^{-3}$)
C_c	Coefficient de courbure
CEBC	Couche à effet de barrière capillaire
C_p	Teneur en pyrite ($M.M^{-1}$)
C_{pf}	Teneur en pyrite après essai de consommation ($M.M^{-1}$)
C_{pi}	Teneur en pyrite avant essai de consommation ($M.M^{-1}$)
CRE	Courbe de rétention d'eau
C_u	Coefficient d'uniformité
C_w	Concentration à l'équilibre de l'oxygène dans l'eau ($M.L^{-3}$)
D	Diamètre des grains (L)
D_{10}	Diamètre correspondant à 10% des grains passant (L)
D_{30}	Diamètre correspondant à 30% des grains passant (L)
D_{50}	Diamètre correspondant à 50% des grains passant (L)
D_{60}	Diamètre correspondant à 60% des grains passant (L)
D_a^0	Coefficients de diffusion de l'oxygène (libre) dans l'air ($L^2.T^{-1}$)

D_e	coefficient de diffusion effectif
D_e^*	coefficient de diffusion apparent
$d_{\text{éq}}$	diamètre équivalent (L)
D_H	Diamètre équivalent des grains (L)
DMA	Drainage minier acide
D_r	Densité relative des grains solides avant essai de consommation (-)
D_{rf}	Densité relative des grains solides (-)
D_{ri}	Densité relative des grains solides après essai de consommation (-)
DRX	Diffraction des rayons X
D_w^0	coefficients de diffusion de l'oxygène (libre) dans l'eau ($L^2.T^{-1}$)
e	Indice des vides (-)
E^0 ou ORP	Potentiel électrochimique
E_h	Potentiel d'oxydoréduction
e_{opt}	Indice des vides optimal (-)
F	Flux d'oxygène ($M.L^{-2}.T^{-1}$)
g	accélération gravitationnelle ($L.T^{-2}$)
Gx	Goldex
h	Charge hydraulique (L)
H	Constante de Henry (-)
$h_{C0,G}$	Remontée capillaire équivalente (L)
i	Gradient hydraulique (-)
K'	Réactivité intrinsèque de la pyrite pure avec l'oxygène ($L^{-3}.T^{-1}$)
KC	Kozeny Carman
KCM	Kozeny Carman modifié

K_r	Coefficient du taux de réaction ($L^3.L^{-3}.T^{-1}$)
K_r	Coefficient du taux de réaction modifié ($L^3.L^{-3}.T^{-1}$)
K_r^*	Coefficient du taux de réaction apparent ($L^3.L^{-3}.T^{-1}$)
k_{sat}	conductivité hydraulique saturée ($L.T^{-1}$)
k_w	conductivité hydraulique non saturée ($L.T^{-1}$)
MERN	Ministère de l'énergie et des ressources naturelles
MK	Modèle de Kovacs modifié
MNO	Manitou non oxydé
MO	Manitou oxydé
MRNF	Ministère des ressources naturelles et des forêts
m_{vg}	Paramètre d'ajustement du modèle de van Genuchten
n	Porosité (-)
n_{vg}	Paramètre d'ajustement du modèle de van Genuchten
P	Pression ($M.L^{-1}.T^{-2}$)
p_a	Exposant lié à la tortuosité de la phase gazeuse (-)
Pa	Potentiel d'acidification (kg/t $CaCO_3$)
PN	Potentiel de neutralisation (kg/t $CaCO_3$)
PNC	Potentiel de neutralisation des carbonates (kg/t $CaCO_3$)
$PNCN$	Potentiel de neutralisation net étendu (kg/t $CaCO_3$)
PNN	Potentiel de neutralisation net (kg/t $CaCO_3$)
POLY	Polytechnique Montréal
p_w	Exposant lié à la tortuosité de la phase aqueuse (-)
q	Débit spécifique ou vitesse de Darcy ($L.T^{-1}$)
SCM	Shrinking core model

SNO	Selbaie non oxydé
SO	Selbaie oxydé
S_r	Degré de saturation (-)
S_s	Surface spécifique ($L^2.M$)
S_{sr}	Surface spécifique de réaction ($L^2.L^{-3}$)
t	Temps (T)
$t_{1/2}$	Temps de demi-vie (T^{-1})
$t_{1/2}^*$	Temps de demi-vie apparent (T^{-1})
u ou u_w	charge de pression d'eau (L)
u_a	charge de pression d'air (L)
UQAT	Université du Québec en Abitibi-Témiscaminque
USCS	Unified Soil Classification System
v	Vitesse d'écoulement du fluide ($L.T^{-1}$)
V_v	Volume des vides (L^3)
V_w	Volume d'eau (L^3)
w	Teneur en eau massique (%)
WEV	Water entry value ou pression d'entrée d'eau ($M.T^{-2}.L^{-1}$)
w_{opt}	Teneur en eau massique optimale (%)
z	Élévation (L)
μ_w	Viscosité dynamique de l'eau ($10^{-3} Pa.s^{-1}$ à $20^\circ C$)
α	Facteur de forme (-)
α_{vg}	Paramètre d'ajustement du modèle de van Genuchten
γ_w	Poids unitaire de l'eau ($9,8 kN.m^{-3}$ à $20^\circ C$)
ΔC_p	Perte en pyrite ($M.M^{-1}$)

Δt	Durée d'un essai de consommation (T)
θ_a	Teneur en air (-)
θ_e	Teneur en eau volumique réduite (-)
θ_{eq}	Porosité équivalente (-)
θ_r	Teneur en eau volumique résiduelle (-)
θ_s	Teneur en eau volumique à saturation (-)
θ_w	Teneur en eau volumique ($L^3.L^{-3}$)
ρ	Masse volumique ($M.L^{-3}$)
ρ_d	Masse volumique du sol sec ($M.L^{-3}$)
ρ_s	Masse volumique des grains solides ($M.L^{-3}$)
Ψ	Succion ($M.T^{-2}.L^{-1}$)
Ψ_0	Succion pour laquelle une sécheresse totale est atteinte ($M.T^{-2}.L^{-1}$)

LISTE DES ANNEXES

Annexe A – Résultats des ESSAIS PROCTOR MODIFIÉ sur les résidus MNO et Goldex	151
Annexe B – Résultats des essais de perméabilité à charge variable en cellule triaxiale sur les résidus MNO et Goldex.....	155
Annexe C – Résultats des analyses léco.....	158
Annexe D – Résultats des analyses aux drx	159
Annexe E – Résultats des essais de diffusion de l’oxygène.....	191
Annexe F –Résultats des essais de consommation de l’oxygène.....	199
Annexe G – Exemple de calcul amenant a la détermination de la plage d’incertitude du degré de saturation pour les essais de diffusion et de consommation de l’oxygène.....	208
Annexe H – Exemple de calcul amenant à la détermination de la plage d’incertitude du coefficient de diffusion pour les essais de diffusion et de consommation de l’oxygène	210
Annexe I –Exemple de calcul amenant à la détermination de la plage d’incertitude du coefficient du taux de réaction pour les essais de consommation de l’oxygène	211
Annexe J – Résultats des calculs d’incertitude sur le paramètres k_r pour les essais de consommation de l’oxygène menés sur les échantillons des séries 2, 3 et 4	212
Annexe K –Analyse des paramètres normalisés	213
Annexe L – Résultats des essais de consommation d’oxygène réalisés par Gosselin (2007).....	229

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Généralités

L'exploitation minière entraîne la formation de rejets divers, sous forme solide, liquide et gazeux. Dans la catégorie des déchets solides, on regroupe surtout les roches stériles et les résidus miniers (Aubertin et al. 2002). Les stériles sont issus de l'excavation de la roche encaissante. Ils ne contiennent que peu ou pas de valeurs commerciales et sont usuellement entreposés sous forme de haldes. Les résidus miniers sont issus du traitement minéralurgique. Ce sont des matériaux similaires à des sols à granulométrie relativement fine (sable, silt). Ils sont généralement déposés sous forme de pulpe dans des bassins de rétention appelés parc à résidus (Aubertin et al. 2011). Les minéraux sulfureux contenus dans ces matériaux, comme la pyrite, s'oxydent au contact de l'oxygène de l'air et de l'eau. Cela peut entraîner la formation de drainage minier acide (DMA). Le DMA se caractérise par une eau au pH acide et contenant une concentration en sulfates et métaux lourds élevée. Les conséquences du DMA peuvent être dévastatrices pour l'environnement.

Il existe une variété de méthodes de gestion des résidus et de prévention du DMA. Le principe de base pour la prévention repose sur l'isolement d'un des réactifs (minéraux sulfureux, eau, oxygène). Les solutions préconisées sont souvent liées au climat du secteur et au potentiel de génération d'acide des résidus sulfureux. En climat humide, il est souvent plus pratique de viser une réduction des interactions avec l'air (oxygène) qu'avec l'eau. On essaie alors de réduire le flux d'oxygène entrant en contact avec les résidus réactifs. On peut utiliser différentes méthodes de recouvrement agissant comme une barrière à l'oxygène, notamment le recouvrement en eau, le recouvrement monocouche avec surélévation de la nappe phréatique ou le recouvrement multicouche avec effets de barrière capillaire. Ces techniques visent à réduire la quantité d'oxygène qui entre en contact avec les rejets réactifs.

De telles méthodes nécessitent une bonne connaissance des paramètres intervenant dans les processus d'oxydation, notamment le taux de réaction des minéraux sulfureux. Bien que la recherche ait beaucoup avancé dans ce domaine, il reste encore des incertitudes sur cette caractéristique et sur ses paramètres d'influence. Des investigations supplémentaires sont donc essentielles à une meilleure compréhension et maîtrise de ces processus.

1.2 Résidus miniers réactifs

Les rejets de concentrateurs sont usuellement stockés dans des bassins de rétention appelés parcs à résidus miniers. Conformément au principe de prévention du DMA qui vise à réduire le flux d'oxygène entrant en contact avec des résidus miniers réactifs, il faut alors tenter de les isoler en créant une couverture qui agit comme barrière à l'oxygène (Aubertin et al, 2002). Pour cela, on peut utiliser différents types de recouvrement. Le flux d'oxygène dépend alors de la diffusion moléculaire, qui s'exprime à partir des lois de Fick (Collin, 1987 ; Collin et Rasmuson, 1988, Nicholson et al. 1989 ; Yanful, 1993; Mbonimpa et al. 2003). L'évaluation du flux peut ainsi s'exprimer en fonction des valeurs du coefficient de diffusion de l'oxygène D_e et du coefficient taux de réaction des résidus K_r . Des essais de laboratoire ou de terrain, conçus à cette fin, permettent de mesurer ces deux paramètres (Mbonimpa et al. 2003 ; Gosselin, 2007). Des modèles prédictifs ont aussi été proposés pour estimer ces valeurs, incluant celui développé par Collin (1987) qui permet de représenter l'influence des caractéristiques granulométriques et minéralogiques des résidus miniers sur le taux de réaction. La validation expérimentale de ce modèle est toutefois incomplète et sa représentativité soulève encore des questions (Gosselin, 2007 ; Pabst, 2011).

1.3 Présentation du projet de recherche et contenu du mémoire

L'objectif principal de ce projet de recherche est de mieux comprendre l'influence des paramètres granulométriques et minéralogiques sur le taux de réaction des résidus miniers sulfureux. On s'intéresse plus particulièrement à l'effet de la taille des grains, leur surface spécifique, la teneur en pyrite et le degré de saturation. Une étude expérimentale de laboratoire a été menée à cette fin en réalisant des essais de diffusion et des essais de consommation d'oxygène. Plus particulièrement, le projet comprenait les activités suivantes :

- Préparer et caractériser des séries d'échantillons de résidus permettant d'analyser expérimentalement l'effet des paramètres à l'étude ;
- Mesurer la réactivité des différents échantillons par des essais de consommation d'oxygène, et comparer ces résultats à ceux fournis par le modèle de Collin (1987) ;
- Caractériser certains échantillons avant et après les essais de consommation d'oxygène, afin d'évaluer l'évolution de certains paramètres dans le temps ;

- Réaliser une étude sur l'incertitude des résultats des essais de diffusion et de consommation de l'oxygène en laboratoire.

Le présent mémoire, qui présente l'ensemble de ces activités, se compose de 6 chapitres. Après ce premier chapitre d'introduction, une revue de littérature fait le point sur l'état des connaissances scientifiques. Les phénomènes d'oxydation de la pyrite, les principes fondamentaux liés à l'écoulement de l'eau en milieu poreux saturé et non saturé, et les mécanismes associés à la diffusion et la consommation de l'oxygène sont présentés.

Le chapitre 3 décrit la méthodologie expérimentale développée et appliquée pour mener cette étude. On y présente le mode de préparation des échantillons, suivi d'une description des essais de caractérisation qui incluent notamment des analyses granulométriques, minéralogiques et hydrogéologiques. On décrit ensuite les essais de diffusion et les essais de consommation d'oxygène. Enfin, la méthode développée pour l'analyse de l'incertitude sur les résultats des essais de diffusion et de consommation de l'oxygène est expliquée.

Le chapitre 4 présente les résultats de l'ensemble des essais (caractérisation, consommation et diffusion de l'oxygène).

Le chapitre 5 porte sur l'analyse des incertitudes sur les résultats des essais de diffusion et consommation d'oxygène, ainsi que sur l'interprétation des résultats des essais de consommation de l'oxygène et des essais de caractérisation avant et après ces essais. Il comporte aussi une analyse et discussion de ces résultats.

Le dernier chapitre apporte une conclusion et des recommandations à ce projet de recherche.

Quelques résultats complémentaires sont aussi rapportés en annexe.

Les principales contributions scientifiques originales de ce projet sont associées à l'étude de l'influence des paramètres granulométriques et minéralogiques sur le taux de réaction de résidus miniers sulfureux provenant de deux mines de l'Abitibi (Goldex et Manitou), à partir de mesures sur des mélanges ayant des caractéristiques variées. Les résultats présentés dans ce mémoire ont permis de confirmer la validité de certaines hypothèses liées à la réactivité des résidus miniers, ainsi que les limitations propres aux techniques de mesure et au modèle prédictif de Collin (1987).

Ce projet de recherche a également permis de répondre à des objectifs secondaires.

Nous avons évalué l'effet des incertitudes des mesures pour les résultats des essais de diffusion et les essais de consommation d'oxygène, ainsi que sur la détermination de divers paramètres. Les résultats montrent que le paramètre le plus sensible à cet égard est le degré de saturation S_r .

L'étude de l'évolution de certaines caractéristiques (teneur en soufre, teneur en pyrite, densité relative des grains solides D_r) dans le temps montre que la densité relative des grains D_r serait un bon indicateur pour suivre les variations géochimiques. Cette valeur montre une diminution presque systématique durant les essais de consommation de l'oxygène. Certaines hypothèses sont posées comme piste pour des travaux futurs.

Globalement, les objectifs de départ du projet ont été rencontrés. Les résultats présentés ici pourront être utiles pour la suite des travaux sur le DMA produits par les résidus miniers réactifs.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

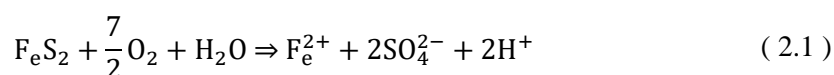
Ce chapitre est une synthèse de l'état des connaissances en lien avec ce projet. On y présente d'abord des informations sur la production et la prévention du drainage minier acide (DMA). Nous revoyons ensuite les techniques pour analyser l'écoulement de l'eau et le flux d'oxygène dans les résidus miniers. Nous insistons enfin sur les facteurs influençant la consommation et la diffusion de l'oxygène.

2.1 Le drainage minier acide

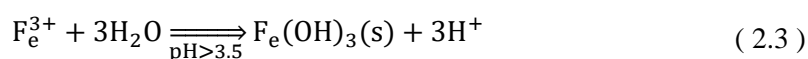
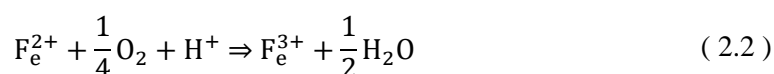
2.1.1 Formation

Les minéraux sulfureux contenus dans les rejets miniers se trouvent, en général, dans un état d'équilibre géochimique lorsqu'ils sont dans leur milieu naturel (le sous-sol). Suite à leur extraction, fragmentation et entreposage, les conditions changent et ces minéraux peuvent devenir instables. Exposés à un milieu oxydant, ils réagissent au contact de l'oxygène de l'air et à l'eau.

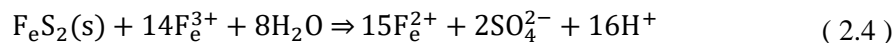
Le minéral sulfureux le plus étudié dans la littérature est la pyrite, car il est souvent le plus abondant dans les résidus (Aubertin et al., 2002). Les étapes de son oxydation sont résumées dans la figure 2.1. L'oxydation directe de la pyrite entraîne la formation de sulfates, de fer ferreux et une acidification des eaux (par production d'acide sulfurique). On peut résumer cette réaction par l'équation suivante (e.g. Nicholson, 1994) :



Le fer ferreux en solution peut s'oxyder en fer ferrique. Ce dernier peut précipiter sous forme d'hydroxyde de fer, lorsque le pH reste assez élevé (i.e. : $\text{pH} \geq 3.5$ environ). Ces deux étapes sont respectivement décrites selon les équations ci-dessous (Nicholson, 1994) :



La formation d'acide entraîne progressivement une diminution du pH de l'eau. Lorsque le pH atteint une valeur d'environ 3,5, l'hydroxyde de fer n'est plus stable. Le fer ferrique en solution peut contribuer à oxyder indirectement la pyrite sans présence d'oxygène (Nicholson, 1994) :



Cette réaction produit une grande quantité d'acide, à vitesse élevée, et est souvent associée aux conditions propices à la production significative de DMA.

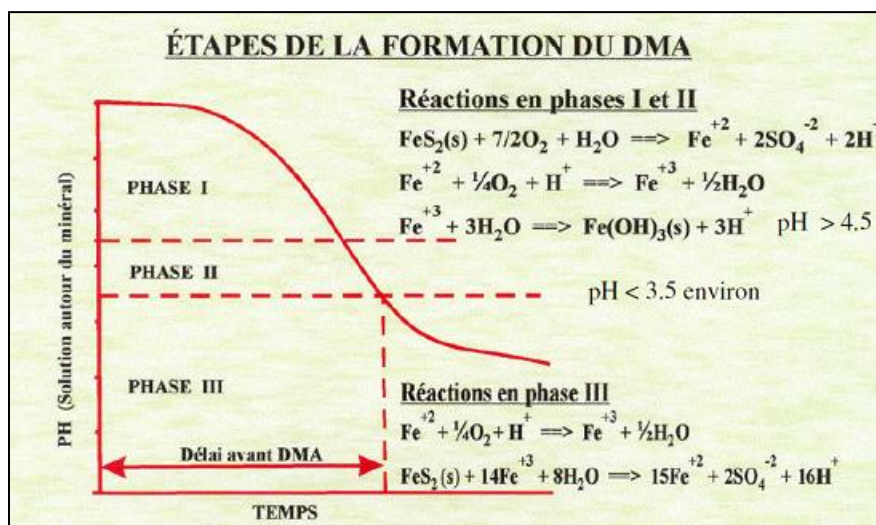


Figure 2.1 : Schéma des étapes réactionnelles de la formation d'un DMA (d'après Stumm et Morgan, 1981, repris par Aubertin et al., 2002)

Outre la pyrite (FeS_2), les minéraux réactifs contribuant à la formation de DMA incluent notamment la pyrrhotite (Fe_{1-x}S), la chalcoppyrite (CuFeS_2) et l'arsénopyrite (AsFeS) (Kwong, 1993 ; Nicholson et Scharer, 1994).

2.1.2 Facteurs qui influencent la production du DMA

La stabilité chimique d'un sulfure en présence d'oxygène est variable selon sa nature minéralogique. Jambor (1994) a classé des sulfures par ordre de réactivité (ou vitesse de réaction) dans les mêmes conditions de pH :

Pyrrhotite > galène-sphalérite > pyrite-arsénopyrite > chalcoppyrite > magnétite.

Par exemple, la pyrrhotite (Fe_{1-x}S) s'oxyderait 20 à 100 fois plus rapidement que la pyrite (FeS_2) (Nicholson et Scharer, 1994).

La cristallographie peut également jouer un rôle dans l'oxydation des minéraux comme la pyrite ; par exemple, des études ont montré que la réactivité de la marcassite (FeS_2 , cristallographie différente de la pyrite) était plus marquée que celle de la pyrite (FeS_2). La pyrite framboïdale est plus réactive que la pyrite cubique (Nicholson, 1994).

D'autres minéraux sont capables de freiner le pouvoir acidogène des sulfures. Ces minéraux acidivores de types carbonate, silicate et hydroxyde réagissent avec les ions H^+ (responsables de l'acidification) pour neutraliser la solution. Ils peuvent aussi provoquer la précipitation d'autres minéraux dits secondaires lorsque le pH est augmenté. Les minéraux acidivores les plus communs sont : la calcite (CaCO_3), la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), la magnésite (MgCO_3), la sidérite (FeCO_3), la jarosite ($\text{KFe}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$) et la goethite ($\text{FeO}(\text{OH})$) (Blowes et Ptacek, 1994).

Le principal réactif contrôlant l'oxydation directe des résidus miniers est le dioxygène de l'air O_2 . La réaction (eq 2.1) transforme le S_2^{2-} de la pyrite en SO_4^{2-} , ce qui se traduit par une modification de l'état de valence de l'atome de soufre. Il y a libération de sept électrons au cours de ce processus. Des formes intermédiaires peuvent occasionnellement se former comme $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ dans des conditions de pH autour de 8 (cinétiques lentes). Dans les conditions usuelles présentes sur le terrain, on néglige ces étapes intermédiaires et on considère la réaction totale (Nicholson, 1994) (eq. 2.1). Williamson et Rimstidt (1994) auraient montré que le taux de cette réaction pourrait être d'ordre fractionné (et non linéaire, i.e. : pas de premier ordre). Ils ont suggéré que la sorption de l'oxygène sur la pyrite n'est pas le seul processus intervenant dans la réaction. Cette dernière se produirait sur des sites non spécifiques, en plusieurs couches (selon le modèle de Freundlich). Ainsi, le mécanisme contrôlant l'oxydation de la pyrite serait le transfert d'électron des sites cathodiques (où l'oxygène et le fer sont réduits) aux sites anodiques (où les sulfures sont oxydés). Rimstidt et Vaughan (2002) ont aussi mis en évidence le rôle du pH.

Le fer ferrique est le principal réactif contrôlant l'oxydation indirecte de la pyrite, lors de la production de DMA (eq. 2.4). Cette réaction est rapide et consomme beaucoup de fer. Elle est contrôlée par deux conditions (Nicholson, 1994) :

*La présence d'un accepteur d'électron

*La quantité de fer ferrique disponible

La première condition dépend de la présence de fer ferrique, la seconde de deux processus : la formation de fer ferrique par l'oxydation directe du fer ferreux et la stabilité chimique de ce

dernier. La présence d'oxygène favorise la disponibilité du fer ferrique via la réaction d'oxydation du fer ferreux (éq. 2.2). Les conditions de pH affectent la stabilité du fer ferrique, ainsi que les interactions entre l'oxygène, le fer ferreux, et le fer ferrique (Williamson et Rimstidt 1994)

Les bactéries peuvent jouer un rôle de catalyseur dans les réactions d'oxydation directe et indirecte des sulfures de fer. Leur importance est cependant sujette à controverse dans la littérature. Pour certains, elles sont un catalyseur relativement faible lors de l'oxydation directe et très fort lors de l'oxydation indirecte. Cependant, d'autres études ont démontré que le rôle de celles-ci serait plutôt mineur (Leduc, 1997; Morin et Hutt, 1997; Mustin *et al.*, 1992 ; Johnson et al., 2009). L'action de ces bactéries peut être classée selon plusieurs critères (i.e. : pH, température de croissance optimale), incluant l'intervalle de pH dans lequel elles prolifèrent. On identifie alors des bactéries neutrophiles ou acidophiles (e.g. Ouangrawa, 2007).

Au sein d'une solution, une espèce chimique peut être présente sous des formes différentes : c'est ce qu'on appelle la spéciation. Ce phénomène dépend de plusieurs facteurs (i.e. : le pH, le potentiel d'oxydoréduction Eh, la température et la pression). On peut définir des zones de stabilité de chaque forme dans un diagramme Eh-pH (Stumm et Morgan, 1981), pour une température et une pression donnée. Prenons par exemple le diagramme Eh-pH du fer (cf. fig. 2.2). La pyrite est stable dans des conditions réductrices, à faible pH. On remarque cependant qu'en condition neutre et oxydante, la pyrite peut produire de l'oxyhydroxyde de fer.

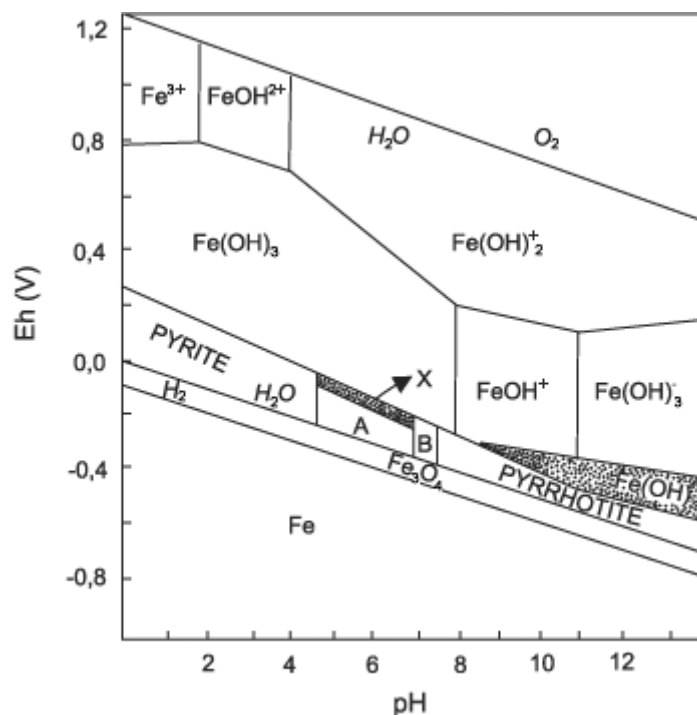


Figure 2.2 : Diagramme Eh-pH du fer (tiré de Lemos et al., 2007)

L'oxydation des sulfures et la précipitation du soufre peut conduire à la production de multiples minéraux secondaires, (i.e. : hydroxydes métalliques, sulfates, carbonates, etc.). La présence de minéraux secondaires complique les réactions d'oxydation car ils peuvent capter le fer ou les ions H^+ (Perkins et al., 1995).

Lorsque plusieurs métaux sont en contact dans une solution acide en présence de sulfate ferrique, un autre type de réaction peut se produire. Un phénomène, appelé processus galvanique, entraîne l'oxydation du minéral ayant le potentiel électrochimique le plus bas (E^0 ou ORP). Par exemple, la pyrite serait protégée galvaniquement (de manière temporaire) en présence de sphalérite ou de chalcoppyrite. Ce phénomène dépend de nombreux facteurs, incluant l'acidité du milieu (Kwong, 1993 ; Evangelou, 1995). Il a été relativement peu étudié dans le cas du DMA.

Des études comparatives menées sur des résidus frais (non oxydés) et des résidus partiellement oxydés menées par Gosselin (2007) et Pabst (2011) montrent des taux d'oxydation différents. Ceci peut être lié à plusieurs facteurs comme la teneur en pyrite ou l'hétérogénéité des résidus prélevés sur les sites étudiés. Cet aspect sera étudié dans ce projet.

La température joue un rôle dans la réaction d'oxydation directe de la pyrite. Plus elle est élevée, plus la vitesse de réaction sera importante. Ce rôle s'exprime usuellement à l'aide d'une formulation exponentielle, connue sous le nom de la loi d'Arrhenius, qui inclue l'effet de la température absolue (K) et d'une énergie d'activation (Stumm et Morgan, 1981 ; Nicholson, 1994).

2.1.3 Prévention du DMA

Des techniques ont été développées pour prévenir et gérer la production de DMA. Elles reposent souvent sur le même principe : un des réactifs est ciblé pour être isolé. Ces réactifs sont l'oxygène, l'eau et les sulfures. Les solutions appliquées en pratique sont souvent fonctions du climat.

Au Québec, le climat étant relativement humide, l'élément fréquemment ciblé est l'oxygène de l'air. Des systèmes de barrières à l'oxygène peuvent être mises en place. Il est par exemple possible de procéder à un recouvrement en eau des résidus pour limiter la disponibilité de l'oxygène. Une autre solution consiste à mettre en place une couverture multicouche à effets de barrière capillaire (CEBC) qui agit comme une barrière à l'oxygène (Aubertin et al., 2002, 2015). Dans cette couverture, une couche reste constamment (presque) saturée en eau (degré de saturation $S_r \geq 85-90\%$) grâce au phénomène de rétention capillaire (décrit dans la partie 2.2.3). Cette couche de rétention d'eau limite la migration de l'oxygène vers les résidus pour deux raisons. La première est que la concentration de l'oxygène à l'équilibre est environ trente fois plus faible dans l'eau ($C_w = 9,2 \text{ mg.L}^{-1}$ à 20°C) que dans l'air ($C_a = 276,7 \text{ mg.L}^{-1}$ à 20°C). La deuxième raison est due à la vitesse de diffusion de l'oxygène qui est beaucoup plus faible dans l'eau que dans l'air (différence d'environ quatre ordres de grandeur) (Mbonimpa et al., 2003).

Dans un climat aride, un système permettant le contrôle de l'infiltration de l'eau (i.e. : système de stockage-relargage de l'eau) peut être mis en place (Stormont et Morris, 1998 ; Zhan et al., 2001). Il s'agit de créer un bris capillaire entre une couche de matériaux fins placée au-dessus d'une couche de matériaux plus grossiers. L'eau de pluie s'infiltre dans la couche peu perméable et y reste stockée par rétention capillaire. Elle peut aussi s'écouler latéralement dans le cas d'une CEBC en pente (Aubertin et al., 2009). En période sèche, l'évaporation permet d'éliminer l'eau accumulée.

Il existe également des méthodes de contrôle ciblant les matériaux réactifs (les sulfures) comme le remblayage souterrain ou la désulfuration. Le remblayage souterrain consiste à retourner les résidus directement dans la mine souterraine, souvent avec un agent liant (comme le ciment) qui limite l'oxydation (Godbout, 2012). Cette méthode est doublement avantageuse. Elle permet de réduire la quantité de résidus à stocker et à gérer en surface et elle améliore la stabilité des ouvrages souterrains. La désulfuration, quant à elle, vise à séparer la fraction sulfurée des résidus, après extraction de la valeur commerciale, par des traitements minéralurgiques (Benzazoua et al., 2008). On obtient ainsi une fraction désulfurée (peu ou pas réactive) et un concentré de sulfure très générateur de DMA, mais beaucoup moins volumineux.

La production de DMA dépend de plusieurs facteurs d'influence qui affectent l'oxydation directe et indirecte incluant les mécanismes régissant les flux d'oxygène et d'eau. Ces facteurs doivent être pris en compte pour la conception d'un recouvrement en eau, d'une CEBC, ou des autres alternatives visant à contrôler le DMA.

Afin d'améliorer la gestion et la prévention des DMA, des outils ont été développés afin d'appréhender le comportement géochimique des résidus à court, moyen et long terme. Les essais statiques permettant, à partir d'une caractérisation géochimique ponctuelle du résidu, de statuer sur son potentiel de génération de DMA (Villeneuve, 2004). Lorsque ces essais ne permettent pas de conclure, on peut mener des essais cinétiques, qui permettent de mieux comprendre l'évolution géochimique à moyen et long terme.

Trois méthodes sont couramment utilisées dans la littérature pour évaluer le potentiel de génération de DMA à partir d'essais statiques, i.e. celles de Kwong (1993), Lawrence and Wang (1997), Paktunc (1999).

L'approche de Lawrence and Wang (1997), qui est souvent employée, repose sur l'hypothèse que tout sulfure réagit comme la pyrite, et que tout carbonate réagit comme la calcite. Pour appliquer cette méthode, on caractérise d'abord le potentiel d'acidification PA à partir de la teneur en soufre (total ou de sulfure) selon la relation suivante :

$$PA = 31,25 * \%S_{\text{Sulfures}} ; \text{ en } \frac{\text{kgCaCO}_3}{1000\text{kg}} \quad (2.5)$$

On évalue aussi le potentiel de neutralisation PN et le potentiel de neutralisation des carbonates PNC. On obtient PN par titrage acido-basique et PNC en quantifiant le carbone inorganique (%C ou %CO₂ inorganique) selon la relation suivante :

$$\text{PNC} = 83,33 * \%C_{\text{inor}} = 22,74 * \%CO_2 ; \text{ en } \frac{\text{kgCaCO}_3}{1000\text{kg}} \quad (2.6)$$

On peut ainsi évaluer le potentiel de neutralisation net (PNN=PN-PA), le potentiel de neutralisation net étendu (PNCN=PNC-PA) et le rapport PN/PA qui permettent de statuer sur le comportement géochimique des résidus comme suit (Villeneuve, 2004) :

-Si PNN > 20, ou PN/PA > 2,5, alors il y a peu de chance qu'un DMA se produise.

-Si PNN < -20, ou PN/PA < 1, alors la génération d'acide est probante.

Entre les deux types de conditions (i.e. : -20 < PNN < 20 ou 1 < PN/PA < 2,5), les résultats sont non concluants. Il est alors recommandé de mener des essais cinétiques (en colonnes, cellules humides, réacteur soxhlet, etc.) qui apporteront des informations complémentaires (Aubertin et al., 2002 ; Villeneuve, 2004 ; Pabst, 2011).

Cette approche sera utilisée plus loin (voir chapitre 4).

Les approches préconisées par Kwong (1993) et Paktunc (1999) permettent de prendre en compte des facteurs non considérés par celle de Lawrence et Wang (1997), comme les effets cinétiques (les minéraux réagissent différemment) et granulométriques.

2.2 Propriétés hydrogéologiques des milieux saturé et non saturé

L'étude de l'écoulement de l'eau en condition saturée et non saturée est primordiale pour l'élaboration d'un plan de gestion des résidus miniers. La présentation qui suit, qui résume les principales composantes d'interprétation, est en grande partie tirée des synthèses incluses dans Aubertin et al. (2002), Ouangrawa (2007) et Pabst (2011) (voir aussi les ouvrages de Hillel, 1998; Delleur, 1998; Miyazaki, 2006)

2.2.1 Domaine saturé

L'écoulement d'un point A vers un point B s'effectue si la charge hydraulique en A est supérieure à celle en B. On définit la charge hydraulique h (L) par :

$$h = z + \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \quad (2.7)$$

Avec z , l'élévation (L)

P , la pression ($M.L^{-1}.T^{-2}$)

ρ , la masse volumique du fluide ($M.L^{-3}$)

v , la vitesse d'écoulement du fluide ($L.T^{-1}$)

g , l'accélération gravitationnelle ($L.T^{-2}$)

Dans cette équation, la vitesse de l'eau est souvent négligeable et on peut écrire :

$$h = z + u \quad (2.8)$$

$$u = \frac{P}{\rho g} \quad (2.9)$$

u est appelée la charge de pression d'eau (ou la succion, en condition non saturée) ; l'unité usuelle est le kPa (ou le mètre d'eau si exprimé en terme de charge).

En condition saturée, le débit d'écoulement de l'eau (en une direction) est régi par la loi de Darcy qui peut s'écrire comme suit :

$$q = -k_{sat}i \quad (2.10)$$

avec q [$L.T^{-1}$] : débit spécifique ou vitesse de Darcy

k_{sat} [$L.T^{-1}$] : conductivité hydraulique saturée

i [-] : gradient hydraulique ;

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta z} \quad (2.11)$$

En généralisant en trois dimensions, on obtient :

$$q = \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = -[k_{i,j}] \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \\ i_z \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$k_{i,j}$: matrice de conductivité hydraulique

$i_{x,y,z}$: gradient hydraulique dans les directions x,y,z respectivement

$q_{x,y,z}$: vitesse de Darcy dans les directions x,y,z respectivement

La valeur de la conductivité hydraulique peut être mesurée en laboratoire ou sur le terrain. Une équation proposée par Mbonimpa et al. (2002) (modèle KCM) peut aussi être utilisée pour estimer la conductivité hydraulique saturée des matériaux poreux granulaires comme les résidus miniers. Elle s'écrit comme suit :

$$k_G = C_G \frac{\gamma_w}{\mu_w} \frac{e^{3+x}}{1+e} C_u^{1/3} D_{10}^2 \quad (2.13)$$

Où C_G et x sont des constantes (0,1 et 2 respectivement pour k_G en cm.s^{-1} et D_{10} en cm)

γ_w est le poids unitaire de l'eau ($9,81 \text{ kN.m}^{-3}$)

μ_w est la viscosité dynamique de l'eau (10^{-3} Pa.s)

D_{10} est le diamètre pour lequel 10% en masse des grains d'un sol sont de taille inférieure (cm)

e est l'indice des vides (-)

C_U le coefficient d'uniformité du sol :

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.14)$$

D_{60} est le diamètre pour lequel 60% des grains d'un sol sont de taille inférieure (cm)

Le modèle prédictif de Kozeny-Carman, KC, peut aussi être utilisé. La valeur de k_{sat} est alors donnée par (Chapuis et Aubertin, 2003) :

$$k_{\text{sat}} = 10^{\left(0,5 + \log\left(\frac{e^3}{D_r^2 S_s^2 (1+e)}\right)\right)} \quad (2.15)$$

Avec D_r la densité relative des grains solides, S_s la surface spécifique ($\text{m}^2.\text{kg}^{-1}$). Ces deux équations (2.13 et 2.15) seront utilisées dans la suite (voir Chapitre 4) pour estimer la valeur de k_{sat} pour les résidus miniers caractérisés ici.

2.2.2 Domaine non saturé

En condition non saturée, la conductivité hydraulique n'est plus constante car elle varie avec la teneur en eau (ou le degré de saturation). Lors du drainage des matériaux, les pores vont progressivement se vider d'eau et se remplir d'air, ce qui se traduit par une diminution de la conductivité hydraulique. Dans un matériau poreux placé au-dessus de la nappe phréatique, une pression d'eau négative va s'exercer : c'est la succion Ψ (en kPa), qui s'exprime :

$$\Psi = u_a - u_w \quad (2.16)$$

Avec u_a et u_w les charges de pressions d'air et d'eau (L) respectivement.

On peut partir de l'équation du débit d'écoulement généralisée de Darcy pour déduire celle de l'écoulement en condition non saturée. L'équation de Richards (1931) est l'équation de conservation pour un milieu partiellement saturé :

$$q_w = -k_w(\Psi).i \quad (2.17)$$

Ou dans un repère tridimensionnel cartésien :

$$q_w = -k_w(\Psi). \nabla . h \quad (2.18)$$

L'écoulement est soumis aux lois de continuité et de conservation de la masse. L'équation de conservation de la masse s'écrit :

$$\text{En 1D : } \frac{\partial \theta_w}{\partial t} = - \frac{\partial q_{w,x}}{\partial x} \quad (2.19)$$

$$\text{En 3D : } \frac{\partial \theta_w}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_{w,x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{w,y}}{\partial y} + \frac{\partial q_{w,z}}{\partial z} \right) = - \nabla . q_w \quad (2.20)$$

En combinant l'équation de Darcy avec la loi de conservation de la masse dans un repère tridimensionnel, on obtient l'équation de conservation de Richards (1931)

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = \nabla . (k_w(\Psi). \nabla . h) \quad (2.21)$$

$$\text{ou } \frac{\partial \theta_w}{\partial t} = \left(\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x(\Psi) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y(\Psi) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z(\Psi) \frac{\partial h}{\partial z} \right] \right) \quad (2.22)$$

En combinant les équations (2.8) et (2.22) on peut écrire :

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = \left(\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial y} - \frac{\partial z}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial z} - \frac{\partial z}{\partial z} \right] \right) \quad (2.23)$$

L'équation de conservation de Richards en condition transitoire d'écoulement non saturé devient alors :

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_x(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right] + \frac{\partial k(\Psi)}{\partial z} \quad (2.24)$$

Cette équation est couramment utilisée pour représenter l'écoulement de l'eau dans la zone vadose (milieu non saturé). Il faut pour cela évaluer les relations reliant Ψ (suction) et θ_w (teneur en eau volumique) d'une part, et k et θ_w d'autre part. La formulation peut être utilisée pour simuler l'écoulement à l'aide de codes numériques (Aubertin et al., 1996 ; Chapuis et al. 2001; Bussière et al., 2003 ; Ouangrawa, 2007; Pabst, 2011).

2.2.3 Courbe de rétention d'eau

La courbe de rétention d'eau (CRE) est la fonction reliant la teneur en eau volumique θ_w d'un sol (ou un autre milieu équivalent), ou son degré de saturation S_r à la suction Ψ (exprimée en terme de pression ou de charge). Cette courbe est requise pour caractériser le comportement des matériaux non saturés. La CRE peut être mesurée expérimentalement. Elle comporte des paramètres importants, incluant la pression d'entrée d'air (AEV) et la pression d'entrée d'eau (WEV), ainsi que la teneur en eau résiduelle θ_r .

L'AEV est la valeur de la suction à partir de laquelle le matériau (sol, résidu ou autre) initialement saturé en eau, commence à se désaturer et à se remplir d'air en condition de drainage. On considère ici que le matériau est capable de retenir l'eau jusqu'à une certaine valeur de pression négative, par capillarité. Plus la granulométrie d'un sol est fine, plus sa capacité de rétention capillaire est forte (cf.fig.2.3). Ainsi, les sols plus fins maintiennent leur teneur en eau maximale à des succions plus élevées (i.e. leur AEV est plus élevée).

Le WEV est la valeur de pression à partir de laquelle l'eau peut à nouveau entrer dans le sol en mouillage, lorsqu'il est initialement dé-saturé. Ce point est associé à θ_r , la teneur en eau volumique résiduelle. Cette valeur représente la teneur en eau volumique minimale qui reste dans le sol, en phase de drainage, en l'absence d'évaporation.

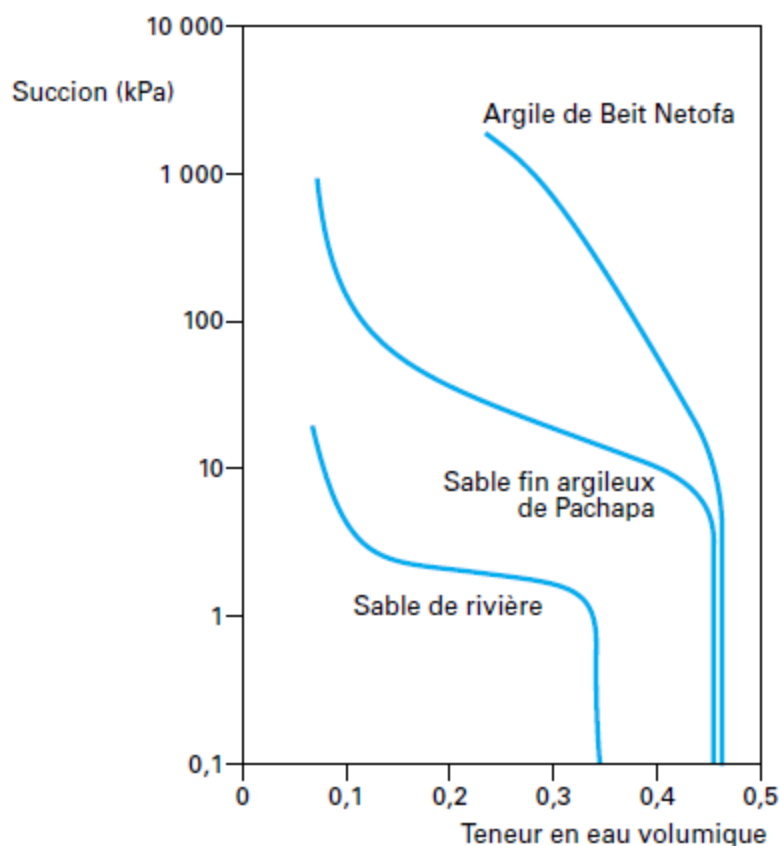


Figure 2.3 : CRE pour trois sols de granulométries différentes (tiré de Delage et Cui, 2000)

La CRE peut être décrite à partir de différentes équations ou modèles (e.g. Brooks et Corey, 1964 ; Gardner, 1958 ; van Genuchten, 1980 ; Fredlund et Xing, 1994). Nous nous sommes intéressés ici à celui de van Genuchten (1980) qui sera utilisé dans la suite du mémoire. Il peut s'exprimer selon la formule suivante :

$$\theta_e = (1 + (\alpha_{vG} * \Psi)^{n_{vG}})^{-m_{vG}} \quad (2.25)$$

Avec α_{vG} , n_{vG} et m_{vG} des constantes d'ajustement du modèle (selon les données expérimentales) ; θ_e est la teneur en eau réduite, définie comme suit :

$$\theta_e = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.26)$$

Avec θ_w la teneur en eau volumique, θ_r la teneur en eau résiduelle, θ_s la teneur en eau volumique à saturation.

Il est aussi possible d'estimer la CRE à l'aide de modèles prédictifs. Dans ce projet, nous avons utilisé le modèle MK, développé par Aubertin et al. (2003). Ce modèle utilise la remontée capillaire équivalente qui s'exprime de la façon suivante pour un sol granulaire :

$$h_{CO,G} = \frac{b}{eD_{10}} \quad (2.27)$$

$$b = \frac{0,75}{1,17 \log(C_U) + 1} \quad (2.28)$$

La relation entre le degré de saturation et la succion se développe ainsi :

$$\theta_w = n \cdot S_r = n (S_c + (1 - \langle 1 - S_a \rangle)(1 - S_c)) \quad (2.29)$$

où $\langle \rangle$ sont des parenthèses de Macauley, i.e. $\langle x \rangle = 0,5(x + |x|)$. Dans cette équation,

$$S_c = 1 - \left[\left(\frac{h_{CO}}{\Psi} \right)^2 + 1 \right]^m \exp \left[-m \left(\frac{h_{CO}}{\Psi} \right)^2 \right] \quad (2.30)$$

$$S_a = a_C C_\Psi \frac{\left(\frac{h_{CO}}{\Psi_n} \right)^{2/3}}{e^{1/3} \left(\frac{\Psi}{\Psi_n} \right)^{1/6}} \quad (2.31)$$

Avec

$$C_\Psi = 1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\Psi}{\Psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{\Psi_0}{\Psi_r} \right)} \quad (2.32)$$

$$\Psi_r = 0,86 h_{CO,G}^{1,2} \quad (2.33)$$

$$m = \frac{1}{C_U} \quad (2.34)$$

Avec a_c le coefficient d'adhésion (0,01),

Ψ_n un paramètre d'uniformisation des unités (1cm lorsque Ψ est en cm)

Ψ_0 est la succion pour laquelle une sécheresse totale est atteinte ($\theta = 0$ quand $\Psi = \Psi_0 = 10^7$ cm).

Aubertin et al. (2003) propose également une équation pour estimer la pression d'entrée d'air AEV :

$$\Psi_a = \frac{b_1}{(eD_H)^{x_1}} \quad (2.35)$$

2.2.4 Conductivité hydraulique non saturée

La fonction reliant k et θ est un autre outil essentiel pour l'étude du comportement des sols non saturés. Elle présente des similitudes avec la CRE, comme l'illustre la figure 2.4. On remarque que lorsque la succion est faible ($< AEV$), la conductivité est à sa valeur de saturation. Lorsque l'AEV est excédée, la valeur de k chute, puis atteint un plateau autour du WEV (et θ_r).

Il est à noter également que dans ces graphiques, le sable devient moins perméable que le silt au-delà d'une certaine valeur de succion. Ce phénomène est utilisé lors de la conception d'une CEBC.

Pour estimer cette fonction, il existe plusieurs modèles (Brooks and Corey, 1964 ; Mualem, 1976 ; Fredlung et al., 1994). Celui de Mualem-van Genuchten (van Genuchten, 1980) est utilisé ici ; il est directement inclus dans le code Vadose/W (GEO-SLOPE International, Ltd., 2007). Il peut s'exprimer comme suit :

$$k_w = k_{sat} \frac{[1 - (a\Psi^{n_{VG}-1})(1 + (a\Psi^{n_{VG}})^{-m_{VG}})]^2}{((1 + a_{VG}\Psi)^{n_{VG}})^{m_{VG}/2}} \quad (2.36)$$

avec k_{sat} la conductivité hydraulique saturée, Ψ la succion (m), a_{VG} , m_{VG} , n_{VG} des paramètres d'ajustement de la courbe; la relation simplificatrice suivante est utilisée ici:

$$n_{vG} = \frac{1}{1 - m_{vG}} \quad (2.37)$$

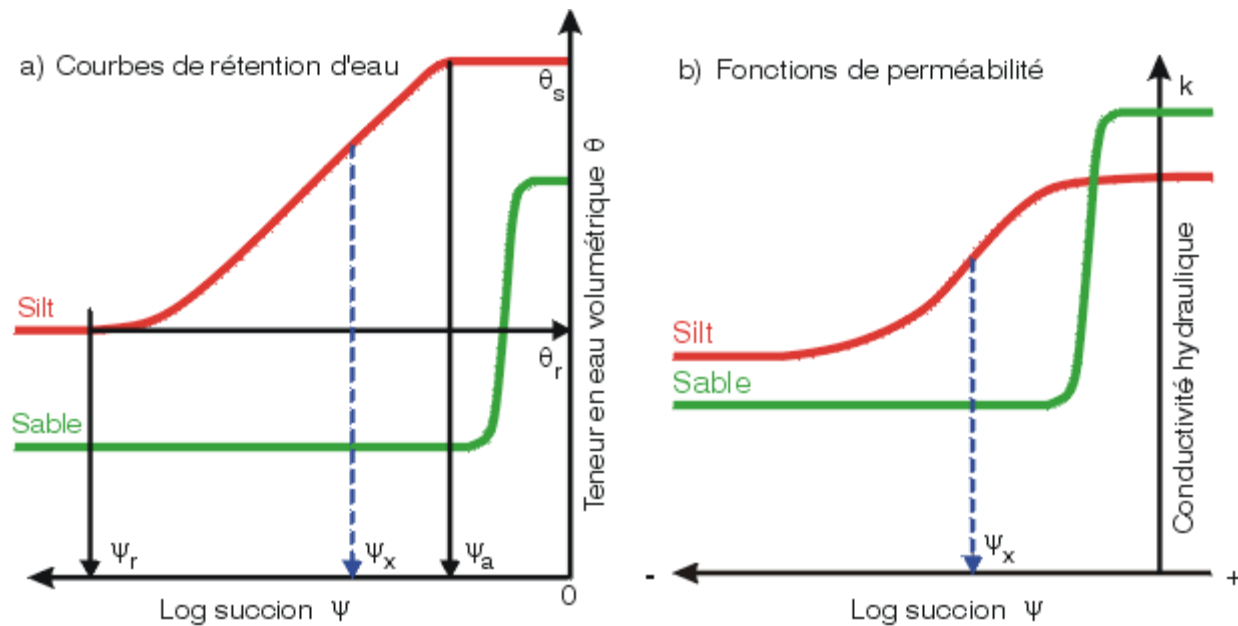


Figure 2.4 : Schématisation de la CRE et de la fonction de perméabilité d'un sable et d'un silt (Aubertin et al., 1995, 2002)

2.3 Diffusion et consommation de l'oxygène

L'étude du flux d'oxygène passant au travers des couches de matériaux non saturés est requise pour planifier la gestion des résidus miniers réactifs. Leur perméabilité intrinsèque étant faible, on considère la diffusion moléculaire comme unique mécanisme de transport de l'oxygène (Mbonimpa et Aubertin, 2003). Cette section présente les équations de base pour décrire les phénomènes de diffusion et de consommation de l'oxygène ; on discute aussi les facteurs d'influence.

2.3.1 Généralités

Le flux d'oxygène F ($M.L^{-2}T^{-1}$) au temps t (T) et à la distance verticale z (L) est régie par la première loi de Fick, qui peut s'écrire de la façon suivante en 1D (Mbonimpa et al., 2003) :

$$F(z, t) = -\theta_{\text{éq}} D_e^* \left[\frac{\partial C(z, t)}{\partial z} \right] = -D_e \left[\frac{\partial C(z, t)}{\partial z} \right] \quad (2.38)$$

C , est la concentration en oxygène (M.L^{-3})

z est l'élévation (L)

t est le temps (T)

D_e^* et D_e sont les coefficients de diffusion apparent et effectif (en $\text{L}^2.\text{s}^{-1}$)

$\theta_{\text{éq}}$ est une porosité équivalente (L^3L^{-3}) qui prend en compte le flux de l'oxygène dissout dans l'eau (Aubertin et al., 1999, 2000) :

$$\theta_{\text{éq}} = \theta_a + H\theta_w \quad (2.39)$$

avec H la constante de Henry à l'équilibre ($H=C_w/C_a = 0,03$ à 20°C)

C_w et C_a sont les concentrations de l'oxygène à l'équilibre dans l'eau et l'air (9 g.m^{-3} d'eau et $278,4 \text{ g.m}^{-3}$ d'air respectivement, à 20°C)

θ_w est la teneur volumique en eau :

$$\theta_w = nS_r \quad (2.40)$$

n est la porosité du matériau

S_r est le degré de saturation en eau :

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (2.41)$$

avec V_w et V_v les volumes d'eau et de vide du matériau respectivement (à noter que les valeurs de n et S_r sont exprimées de façon numérique (pas en %) dans ces équations).

θ_a est la teneur en air volumique :

$$\theta_a = n - \theta_w \quad (2.42)$$

Pour les conditions transitoires (en 1D), le profil de la concentration d'oxygène C ($M.L^{-3}$) en fonction de la profondeur z (L) et du temps t (T) peut être exprimé par la seconde équation de Fick.

-Dans le cas de matériaux non réactifs, cette équation peut s'écrire (Mbonimpa et al., 2003) :

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} \right] (\theta_{eq} C) = \left[\frac{\partial}{\partial z} \right] (D_e \left[\frac{\partial C}{\partial z} \right]) \quad (2.43)$$

-Dans le cas de matériaux réactifs, elle peut être modifiée comme suit (Nicholson et al., 1989 ; Mbonimpa et al., 2003) :

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} \right] (\theta_{eq} C) = \left[\frac{\partial}{\partial z} \right] (D_e \left[\frac{\partial C}{\partial z} \right]) - K_r C \quad (2.44)$$

Où K_r est le coefficient du taux de réaction du matériau (ou taux de consommation de l'oxygène) ($L^3 O_2.L^{-3} \text{rejet}.T^{-1}$). Il sera décrit dans la section 2.3.3.

Afin de pouvoir évaluer (prédire) le flux d'oxygène, il est nécessaire d'évaluer les coefficients de diffusion D_e et de consommation K_r de l'oxygène dans le milieu d'intérêt.

2.3.2 Diffusion

La valeur du coefficient de diffusion D_e peut être mesurée en laboratoire ou sur le terrain (Aubertin et al. 1995, 1999; Mbonimpa et al. 2002, 2011; Gosselin, 2007). Plusieurs modèles ont aussi été proposés pour exprimer le coefficient D_e en fonction des caractéristiques du matériau (e.g. Aachib, 1997; Aubertin et al. 1999, 2000; Mbonimpa et al. 2003). Aachib et al. (2002, 2004) ont évalué différents modèles prédictifs pour estimer la valeur du coefficient de diffusion de l'oxygène D_e , dont ceux de Millington et Shearer (1971), et de Collin (1987). À partir de ces deux modèles, ils ont proposé l'expression suivante :

$$D_e = \frac{1}{n^2} (D_a^0 \theta_a^{p_a} + H D_w^0 \theta_w^{p_w}) \quad (2.45)$$

où D_a^0 et D_w^0 sont les coefficients de diffusion de l'oxygène (libre) dans l'air et l'eau respectivement ($D_a^0 = 1,8 \times 10^{-5} \text{ m}^2.s^{-1}$; $D_w^0 = 2,5 \times 10^{-9} \text{ m}^2.s^{-1}$ à 20°C)

p_a et p_w sont des exposants liés à la tortuosité de la phase aqueuse et de l'air. Ces valeurs peuvent être définies par les expressions suivantes :

$$p_a = 1,201\theta_a^3 - 1,515\theta_a^2 + 0,987\theta_a + 3,119 \quad (2.46)$$

$$p_w = 1,201\theta_w^3 - 1,515\theta_w^2 + 0,987\theta_w + 3,119 \quad (2.47)$$

Ces équations sont valables pour une porosité comprise entre 10% et 80% et un S_r compris entre 10 et 99%. En pratique, on peut souvent utiliser une valeur constante $p_a = p_w \sim 3,3$ à $3,5$.

2.3.3 Consommation

La valeur du coefficient du taux de réaction de l'oxygène K_r peut aussi être évaluée par des essais de laboratoire ou de terrain (e.g. Mbonimpa et al. 2002, 2003, 2011; Gosselin, 2007). Collin (1987, 1997) a proposé un modèle pour la prédiction de K_r . Il s'appuie sur les réactions de surface, avec un taux de réaction proportionnel à la teneur en pyrite. Le modèle peut prendre en compte la surface spécifique disponible pour la réaction d'oxydation S_{sr} (Gosselin, 2007) :

$$K_r = K'S_{sr} \quad (2.48)$$

Où K' est la réactivité intrinsèque de la pyrite ($L^3O_2.L^{-2}pyrite.T^{-1}$) ; S_{sr} ($L^2.L^{-3}$) correspond à la surface spécifique où se produit la réaction. Si on suppose que la pyrite est le seul minéral réactif et que sa distribution est uniforme, on peut écrire (Gosselin, 2007) :

$$S_{sr} = \frac{\alpha}{D} (1 - n) C_p \frac{\rho_s}{\rho_{py}} \quad (2.49)$$

α est un facteur de forme, ρ_{py} ($M.L^{-3}$) est la masse volumique des grains de pyrite et ρ_s est la masse volumique moyenne de tous les grains solides (incluant les grains de pyrite). C_p est la masse de pyrite par masse de matériau sec ($kg.kg^{-1}$). D est le diamètre équivalent des grains ; il peut être estimé à l'aide de l'équation suivante (Aubertin et al., 1998) :

$$D = D_H = (1 + 1,17 \log(C_U)) D_{10} \quad (2.50)$$

Pour des grains de forme sphérique, le facteur de forme α prend une valeur de 6.

Lorsque la masse volumique des grains de pyrite est la même que celle des grains du résidu ($\rho_s/\rho_{py}=1$), on obtient ainsi le modèle de Collin (1987) :

$$K_r = K' \frac{6}{D} (1 - n) C_p \quad (2.51)$$

La valeur $K' = 5 \times 10^{-10} \text{ m}^3 \text{O}_2 \cdot \text{m}^{-2} \text{pyrite} \cdot \text{s}^{-1}$ est souvent utilisée (pour la pyrite pure).

2.3.4 Facteurs d'influence

Le degré de saturation S_r (%) représente la proportion d'eau remplissant les pores d'un matériau poreux. Lorsque la saturation est complète ($S_r = 100\%$), l'oxygène n'est présent et ne circule que sous forme dissoute. La concentration en oxygène dissous dans l'eau C_w (9,2 mg.L⁻¹ à 20°C) est bien inférieure à celle dans l'air C_a (276,7 mg.L⁻¹ à 20°C). De plus, la diffusion de l'oxygène dans l'eau est bien moins rapide que celle dans l'air (Collin, 1987; Aubertin et al., 1999, 2000, 2002). Dans ces conditions, la circulation d'oxygène est fortement limitée par l'eau. Pour des conditions partiellement saturées ($S_r < 100\%$), l'oxygène va circuler dans l'eau et l'air (gaz) présent dans les pores du sol. Plus la fraction gazeuse sera importante, et plus l'oxygène pourra circuler rapidement ; mais plus S_r est élevé, plus D_e est faible, comme l'indique l'équation 2.45 (Aubertin et al., 1995, 1999 ; Aachib, 1997 ; Mbonimpa et al., 2003).

Des phénomènes de rétention capillaire se produisent dans les résidus miniers qui sont usuellement des matériaux silteux. Ces matériaux peuvent rester à un degré de saturation S_r relativement élevé au-dessus de la nappe, selon leurs caractéristiques granulométriques et leur porosité n (Aubertin et al., 2002, 2003). La position de la nappe est donc un facteur important à prendre en compte car elle influence la saturation des sols et résidus et donc le taux d'oxydation des sulfures (Ouangrawa, 2007; Pabst, 2011).

Le modèle de Collin (1987) ne prend toutefois pas cet aspect en ligne de compte. Dans certains cas (Gosselin, 2007 ; Pabst, 2011), ceci peut engendrer un écart assez important entre les prédictions et les résultats obtenus des essais en laboratoire. Certaines évidences suggèrent que l'effet du degré de saturation S_r sur la vitesse de consommation d'oxygène ne serait pas négligeable. La vitesse de consommation d'oxygène aurait ainsi tendance à augmenter avec le degré de saturation jusqu'à ce que S_r atteigne environ 20%. Au-delà de cette valeur, le taux de réaction semble stable (fig. 2.5), bien que certaines aient considéré la possibilité que le taux

puisse diminuer lorsque S_r se rapproche de 100%. Sur la figure 2.5, on voit donc que K_r augmente avec S_r lorsque la teneur en eau est faible ; ceci s'explique par le fait que la réaction d'oxydation de la pyrite a besoin d'eau pour se développer. Par conséquent, à des degrés de saturation faibles, la réaction serait contrôlée par la disponibilité en eau. À un degré de saturation plus élevé ($S_r > 20\%$ environ), le taux de réaction deviendrait pratiquement constant (contrôlé par la disponibilité en O_2), avec une valeur de K_r suivant d'assez près les prédictions du modèle de Collin (1987).

Une équation préliminaire a été proposée pour tenir compte de l'effet de S_r lorsque l'effet du degré de saturation doit être pris en compte (Gosselin, 2007) :

$$K_r = K_{rm} \left[1 - \left(1 - \frac{S_r}{b} \right) \right]^{x_1} \quad (2.52)$$

Où b est la valeur de S_r pour lequel le plateau est atteint (i.e. environ 0.20 ou 20 %).

x_1 est un paramètre contrôlant la courbure de la relation.

K_{rm} est le coefficient du taux de réaction modifié (an^{-1})

Certaines évidences expérimentales (Gosselin et al. 2012) ont aussi soulevé la possibilité (hypothèse) que pour des degrés de saturation S_r élevés (> 80 à 90% environ), la valeur de K_r aurait tendance à diminuer en raison de la faible disponibilité en oxygène due à une diffusion lente (voir aussi Hollings et al., 2001). Les résultats expérimentaux ne sont toutefois pas concluants à cet égard.

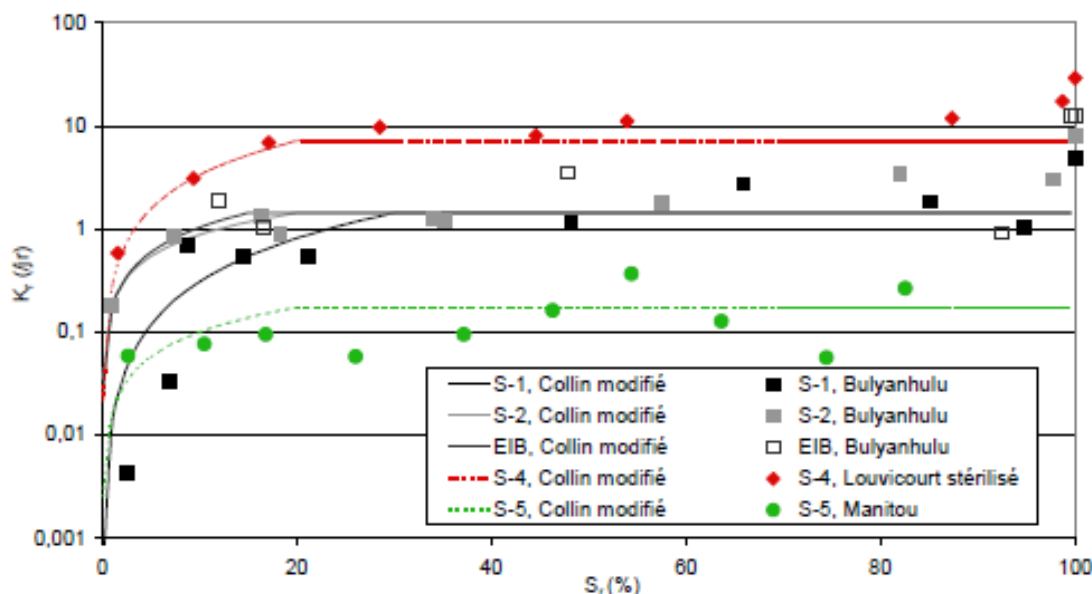


Figure 2.5 : Valeurs du taux de réaction K_r mesurées et prédites avec le modèle de Collin (1987) (éq. 2.51) modifié; les données expérimentales sont aussi montrées (tiré de Gosselin, 2007).

Le taux de réaction est aussi influencé par la surface spécifique des particules, qui représente la surface extérieure par unité de volume (ou par unité de masse). Cette caractéristique des grains définit la surface disponible pour tous les phénomènes chimiques et physiques s'effectuant en surface (incluant l'adsorption, la dissolution et l'oxydation). Elle est reliée directement à la taille et la forme des particules (e.g. Kovács, 1981 ; Chapuis et Légaré, 1992).

La relation reliant le diamètre des grains à leur surface spécifique est souvent exprimée comme suit (Hillel, 1998) :

$$S_s = \frac{\alpha}{\rho_s D} \quad (2.53)$$

Avec α un facteur de forme (6 pour sphère), ρ_s la masse volumique du grain solide ($M.L^{-3}$), D son diamètre (L); la surface spécifique S_s est exprimée ici en unités L^2/M .

Chapuis et Légaré (1992) ont proposé d'appliquer l'équation 2.53 à une courbe granulométrique complète ; l'équation qui en résulte peut s'exprimer de la façon suivante :

$$S_s = \frac{6}{\rho_s} \sum \left[\frac{P_{No D} - P_{No d}}{d} \right] \quad (2.54)$$

Avec $(P_{No D} - P_{No d})$ le pourcentage massique des grains dont le diamètre est compris entre la taille de tamis supérieur D et celle du tamis inférieur d . Afin de tenir compte des particules fines passant au travers des tamis les plus fins, ces auteurs ont défini un diamètre équivalent, qui peut être estimé à l'aide de l'équation suivante :

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{D^2}{3}} \quad (2.55)$$

Où D représente la taille (L) du tamis le plus fin utilisé pour la caractérisation granulométrique.

Aubertin et al. (2003) ont utilisé une formulation différente pour exprimer la surface spécifique, inspirée des travaux de Kovács (1981) :

$$S_s = \frac{\alpha}{\rho_s D_H} \quad (2.56)$$

Avec α facteur de forme (une valeur de 10 est usuellement utilisée) et ρ_s la masse volumique du grain solide (g.cm^{-3}) ; dans cette équation, D_H est le diamètre équivalent du matériau (cm), qui peut être obtenue à partir de l'équation 2.50.

Mbonimpa et al. (2002) ont proposé une formulation alternative (inclus dans le modèle KCM, Kozeny Carman modifié) pour la surface spécifique (pour un facteur de forme $\alpha = 10$) :

$$S_s = \frac{10}{\rho_s C_u^{1/6} D_{10}} \quad (2.57)$$

Dans le même ordre d'idées, Nicholson et al. (1988) et Nicholson (1994) ont mené des essais afin d'évaluer la vitesse de réaction d'oxydation sur des échantillons de pyrite. Les analyses des teneurs en sulfate ont montré que la réactivité des grains de pyrite est inversement et linéairement proportionnelle à leur diamètre. Hollings et al. (2001) ont aussi montré que, pour des grains de roches stériles, une augmentation de la surface spécifique accroît le taux d'oxydation. Les particules fines sont donc les plus réactives, puisqu'elles présentent des surfaces spécifiques plus importantes. La relation suivante a été proposée (Hollings et al. 2001) :

$$K_r = 8 * 10^{-10} * D^{-0,307} \quad (2.58)$$

Avec K_r le taux de consommation de l'oxygène ($\text{m}^3\text{O}_2.\text{m}^{-3}\text{rejet.s}^{-1}$) et D est la taille des grains (mm).

2.3.5 Évolution de la taille des grains de pyrite selon le modèle du noyau réactif

La réaction d'oxydation des grains de pyrite peut modifier leur taille. Ce phénomène est quelques fois représenté par le modèle du noyau réactif (shrinking core model, SCM) (Ritchie 1986). Ce modèle a initialement été développé par Yagi et Kunii (1955) afin de représenter la cinétique de réaction (dissolution) d'une particule solide dans un fluide (Gbor et Jia, 2004). Ce modèle repose sur diverses hypothèses, incluant (voir fig. 2.6) :

- la phase solide (appelée noyau) est non poreuse, sphérique et entourée d'un film liquide ;
- il y a transfert de masse entre la phase liquide et la phase solide ;
- la concentration du liquide est constante ;
- la réaction est isothermique ;
- au cours de la réaction, une gaine solide non soluble se forme autour du noyau réactif

La cinétique de dissolution dépendrait alors de trois processus (Gbor et Jia, 2004 ; Hsu et al., 2009) :

- la diffusion (du solide vers le liquide) au travers du film liquide
- la diffusion au travers de la gaine solide (ou croûte)
- la réaction chimique se produisant en surface du noyau réactif

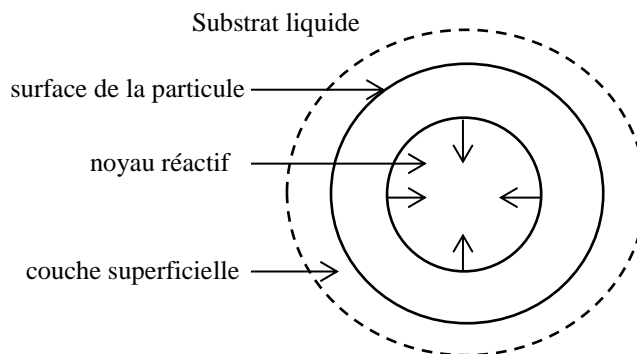


Figure 2.6 : Schéma représentant la cinétique de réaction (dissolution) d'une particule solide dans un fluide (adapté de Safari et al., 2009)

Des phénomènes analogues à ceux décrits par le modèle du noyau réactif seraient aussi actifs lors de l'oxydation directe d'un grain de pyrite, où une gaine (croûte) d'oxyde de fer se forme selon les équations décrites dans la section 2.1.1 (Ritchie 1994 ; Huminicki et Rimstidt, 2009). C'est pourquoi ce modèle est quelques fois utilisé pour analyser l'oxydation des stériles sulfureux (i.e. Molson et al. 2005) et aussi des résidus miniers réactifs (Molson et al. 2008 ; Ouangrawa, 2007; Pabst, 2011).

Ce modèle ne tient toutefois pas compte de l'oxydation indirecte qui se produit lorsque le pH diminuait suffisamment (tout comme le modèle de Collin 1987 d'ailleurs). Dans un tel cas, les précipités d'oxydes de fer ne sont plus stables et un phénomène de lessivage qui peut prendre place. La cinétique des réactions est alors influencée par d'autres facteurs. (Safari et al. 2009)

Malgré ces limitations, le modèle du noyau réactif a été appliqué assez fréquemment au cas du drainage minier acide. A cet égard, il faut mentionner les travaux de Mayer (1999) qui a élaboré un modèle numérique capable de modéliser le transport réactif de composants multiples dans des milieux poreux partiellement saturés (MIN3P). Ce modèle (utilisé aussi à Polytechnique) inclut plusieurs équations qui définissent les réactions hydro-géochimiques du système, dont celles régissant le SCM. Plus d'informations sur cette approche sont présentées dans Molson et al. (2005, 2008), Ouagrawa (2007) et Pabst (2011).

2.4 Modélisation numérique

Il existe plusieurs logiciels permettant de résoudre les équations présentées plus haut pour l'écoulement de l'eau (loi de Richards) et le flux diffusif de l'oxygène (lois de Fick). Dans ce projet, nous avons utilisé deux codes commerciaux, qui sont décrits sommairement dans ce qui suit.

Le logiciel POLLUTE (Rowe et al., 1994) permet de modéliser le transport d'un contaminant au travers d'un matériau saturé. Aubertin et al. (1994, 1995, 1999) et Mbonimpa et al. (2003, 2011 ; 2012) ont adapté ce code numérique pour traiter les lois de Fick afin d'analyser le flux d'oxygène dans un matériau non saturé. On considère alors l'oxygène comme étant le contaminant. Le logiciel prend en compte la réactivité de la pyrite par l'intermédiaire d'un temps de demi-vie apparent $t_{1/2}^*$ (représentant une décroissance radioactive de la concentration de l'oxygène) :

$$t_{1/2}^* = \frac{\ln(2)}{K_r^*} \quad (2.59)$$

On introduit D_e^* et K_r^* le taux de réaction apparent :

$$K_r^* = \frac{K_r}{\theta_{eq}} \quad (2.60)$$

L'introduction de θ_{eq} permet de prendre en compte l'oxygène présent dans les deux phases du milieu (liquide et gazeuse).

On peut utiliser les simulations avec POLLUTE afin de déterminer les valeurs de K_r et de D_e du matériau à partir d'un résultat d'essai (voir section 3.3.6 ; voir aussi Mbonimpa et al. 2003). On procède alors de manière itérative. On crée un modèle représentant l'essai effectué (cellule, colonne, in situ). On divise ce modèle en plusieurs zones (couches) dont les propriétés physiques sont connues. La simulation débute en utilisant les valeurs préliminaires de K_r et D_e données par les modèles prédictifs. Le logiciel traite ces données et, par la résolution numérique des équations de Fick, produit une courbe d'évolution de la concentration de l'oxygène dans le modèle. En comparant les courbes obtenues expérimentalement et numériquement, on peut ajuster itérativement les valeurs de K_r et D_e jusqu'à la superposition complète des courbes de

concentration en oxygène expérimentale et numérique. Plus de détails sur cette approche, qui sera utilisée dans la suite de ce projet, sont présentés dans la section 3.3.6.

L'interprétation des essais peut aussi être réalisée à l'aide du logiciel Vadose/W (Geostudio, GeoSlope Inc.), qui résout numériquement les équations d'écoulement en milieu non saturé. Ce logiciel est souvent utilisé pour analyser l'efficacité des CEBC (incluant le mouvement de l'eau et de l'oxygène). Il a été validé (du moins en partie) par quelques études sous diverses conditions (Gosselin, 2007 ; Pabst, 2011 ; Dagenais et al., 2013). Ce code permet la prise en charge des problèmes hydrogéologiques et de flux gazeux en milieu non saturé, incluant une résolution des équations de Fick. Le logiciel prend en compte directement une valeur du coefficient du taux de réaction, que l'on peut fixer, ainsi que la présence d'oxygène dans les deux fluides. Afin d'évaluer la valeur de K_r du résidu, on procède (comme avec POLLUTE) de façon itérative à partir des résultats expérimentaux. Plus de détails sur cette approche, qui sera utilisée dans la suite de ce projet ainsi que la construction de chaque modèle sont présentés dans la section 3.3.6 de ce mémoire.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE : MATÉRIAUX ET PROCÉDURES EXPERIMENTALES

Ce chapitre présente les différents matériaux utilisés, le mode de préparation ainsi que les différents essais réalisés à Polytechnique Montréal. Les codes numériques utilisés pour l'interprétation de certains résultats sont aussi décrits.

3.1 Matériaux

Les trois matériaux utilisés pour ce projet sont les résidus miniers du site Manitou (résidus non oxydés MNO et oxydés MO) et Goldex (Gx). D'autres résultats d'essais réalisés dans des projets précédents (notamment sur les résidus issus des mines Louvicourt, Bulyanhulu et Selbaie) sont aussi analysés.

3.1.1 Matériaux testés

Le site minier Manitou est localisé en Abitibi-Témiscamingue, à l'est de Val d'Or, Québec. De nombreux propriétaires industriels se sont succédés à partir de 1941. Le dernier ayant fait faillite en 2003, le Ministère des ressources naturelles et de la faune (MRNF) a pris le site en charge et supervise depuis lors un projet de restauration global se déroulant en plusieurs étapes (MERN, 2007 ; Cosset, 2009; Éthier, 2011). L'échantillonnage des résidus MNO et MO s'est effectué sur le site Manitou en octobre 2013 par Stefan Broda. Les résidus MNO ont été prélevés en profondeur (environ 2 m) et les résidus MO près de la surface. Les échantillons ont été placés dans des chaudières à leur teneur en eau naturelle et livrés à Polytechnique Montréal où ils ont été homogénéisés.

Le site minier Goldex, exploité par Agnico Eagle, est situé à 27 km à l'ouest du site Manitou. Ces résidus relativement neutres sont utilisés comme couche de recouvrement pour les résidus Manitou (Éthier et al. 2013). Ils sont acheminés par un pipeline (Mines Québec, 2013). Les échantillons ont été prélevés en décembre 2013 par des membres de l'URSTM-UQAT, placés en chaudières et envoyés à Polytechnique Montréal où ils ont été homogénéisés.

3.1.2 Matériaux des études antérieures

Les résultats d'essais menés sur d'autres résidus ont aussi été analysés pour ce projet. Ce sont des résidus provenant des sites miniers Bulyanhulu (ou Buly), Louvicourt, et Selbaie; des résultats antérieurs sur les résidus miniers Manitou sont aussi pris en compte.

Les résidus miniers Buly proviennent d'une mine située en Tanzanie. Ils ont été l'objet d'études menées par Martin (2006), Gosselin (2007) et Pabst (2011) à Polytechnique Montréal (voir aussi Martin et al. 2010). Ces résidus ont été fournis par la compagnie Barrick Gold Corporation (en 2004).

Les résidus issus de l'ancienne mine Louvicourt, située à 20 km à l'est de Val d'Or, Québec, ont fait l'objet d'études réalisées par Gosselin (2007) et Ouangrawa (2007) à Polytechnique Montréal.

Les résidus de la mine Selbaie, localisée à 120 km au Nord-Est de La Sarre, Québec, ont fait l'objet d'études par Cosset (2010) et Pabst (2011) à Polytechnique Montréal. Cette mine a été en activité jusqu'en 2004, pour l'exploitation du cuivre, du zinc, de l'argent et de l'or. Des échantillons non oxydés (SNO) et oxydés (SO) ont été prélevés en juillet 2007.

Des résultats d'essais sur les résidus MNO (tiré de Pabst, 2011), prélevés en Juin 2007, sont également considérés dans ce mémoire.

3.2 Préparation des échantillons

La préparation de différentes séries de mélanges de résidus est une partie importante de l'approche méthodologique de ce projet. Cette section présente les méthodes de quartage, d'homogénéisation et la préparation des échantillons pour les essais de consommation et de diffusion de l'oxygène.

3.2.1 Homogénéisation et préparation des mélanges

Le quartage des échantillons MNO, MO et Gx s'est effectué en suivant la norme ASTM C702/C702M-11 (2012). Étant donné que les échantillons ont été reçus dans plusieurs chaudières distinctes, nous avons effectué une homogénéisation de l'ensemble.

Plusieurs séries d'échantillons ont été préparées pour cette étude. La série 1 visait à évaluer l'effet de la variation de la teneur en pyrite (C_p). L'objectif est d'obtenir des mélanges de résidus comparables granulométriquement (diamètre équivalent D_H et surface spécifique S_s similaires), avec un pourcentage de pyrite variable. Nous avons réalisé des mélanges à partir des résidus Gx et MNO; les proportions des mélanges réalisés sont (série 1) :

-MNO28 : 28% de résidus MNO et 72% de Gx ;

-MNO50 : 50% de résidus MNO et 50% de Gx ;

-MNO73 : 73% de résidus MNO et 27% de Gx.

La série 2 avait pour objectif d'analyser l'effet du diamètre équivalent D_H et de la surface spécifique S_s . Nous avons effectué une séparation granulométrique du résidu MNO à l'aide d'un tamisage par voie humide et deux tailles de tamis : 75 μm (tamis #200) et 45 μm (tamis #325). Nous avons obtenus ainsi trois échantillons (série 2) :

-MNOfin : partie inférieure à 45 μm ;

-MNOmoy : partie comprise entre 45 μm et 75 μm ;

-MNOgros : partie supérieure à 75 μm .

La série 3 a été préparée suite aux résultats de la série 2. Il a été constaté que la pyrite n'était pas répartie uniformément selon la taille des grains. De ce fait, l'étude de l'effet du diamètre équivalent (ou de la surface spécifique) est devenue problématique car la teneur en pyrite n'était pas la même dans chaque échantillon. L'objectif était donc d'égaliser les teneurs en pyrite. Nous avons d'abord fractionné le résidu Gx (de la même manière que le résidu MNO) par voie humide à l'aide des tamis #200 et #325. Nous avons ensuite choisi la fraction de MNO possédant la teneur en pyrite la plus faible comme référence (i.e. MNOgros avec un C_p de 10.3%). Finalement, nous avons mélangé les fractions de Gx et de MNO afin de contrôler la valeur de C_p . Les proportions ont permis d'obtenir une teneur en pyrite presque égale à la valeur de référence (C_p MNOfin égalisé = C_p MNOmoy égalisé = C_p MNOgros = 10.3%). Nous avons obtenu les mélanges suivants pour la série 3 :

-MNOmoy égalisé : mélange entre MNOmoy (72%) et Gxmoy (28%) ;

-MNOfin égalisé : mélange entre MNOfin (55%) et Gxfin (45%).

Ces échantillons possèdent donc la même teneur en pyrite que MNOgros ($C_p = 10.3\%$), tout en conservant leurs caractéristiques granulométriques distinctes.

La série 4 avait pour objectif d'évaluer l'effet du diamètre équivalent D_H des résidus pour une même teneur en pyrite. Pour cela, nous avons réalisé des mélanges entre les échantillons MNOfin, et les trois classes granulométrique du résidu Gx, en proportion égale (moitié-moitié ou 50-50). Nous obtenons ainsi (série 4) :

-MNOfin-Gxfin : Mélange 50-50 entre MNOfin et Gxfin ;

-MNOfin-Gxmoy : Mélange 50-50 entre MNOfin et Gxmoy ;

-MNOfin-Gxgros : Mélange 50-50 entre MNOfin et Gxgros.

Ces trois mélanges de la série 4 ont des diamètres équivalents variables avec une teneur en pyrite identique (ici le diamètre équivalent des grains de pyrite est identique).

La série 5 visait à évaluer l'effet du degré de saturation (S_r) sur l'oxydation des résidus. Des analyses ont donc été menées pour les résidus MNO et MO à des degrés de saturations différents. La différence entre les échantillons non oxydés (MNO) et oxydés (MO) visait à étudier le rôle de la pré-oxydation.

Le tableau 3.1 résume les diverses caractéristiques des séries 1 à 5. Chaque mélange a fait l'objet d'essais de caractérisation physico-chimique, afin d'évaluer leurs propriétés et pour vérifier que les paramètres visés soient respectés. La minéralogie des résidus MNO, MO et Goldex a été caractérisée avant la préparation des mélanges. Ces derniers ont aussi été caractérisés avant les essais de consommation de l'oxygène (et après, pour certains d'entre eux).

Tableau 3.1 : Récapitulatif des caractéristiques des mélanges des séries 1 à 5, avec les objectifs visés.

Série	Mélange	Paramètre ciblé	Description du mélange	Caractéristiques
1	MNO28	C _p	28% de MNO et 72% de Gx	1) D _H comparable 2) %S et C _p augmentent graduellement de MNO28 à MNO73
	MNO50		50% de MNO et 50% de Gx	
	MNO73		73% de MNO et 27% de Gx	
2	MNOfin	D _H	Grains du résidu MNO ≤ 45 µm	1) D _H augmente progressivement de MNOfin à MNOgros 2) Étude de la répartition de %S et C _p au sein du résidu MNO
	MNOmoy		Grains du résidu MNO compris entre 45 µm et 75 µm	
	MNOgros		Grains du résidu MNO ≥ 75 µm	
3	MNOfin égalisé	D _H	MNOfin mélangé aux grains du résidu Gx ≤ 45µm	1) D _H augmente progressivement de MNOfin égalisé à MNOgros 2) C _p et %S comparables
	MNOmoy égalisé		MNOmoyen mélangé aux grains du résidu Gx compris entre 45 µm et 75 µm	
	MNOgros		Grains du résidu MNO ≥ 75 µm	
4	MNOfin-Gxfin	D _H -pyrite	MNOfin mélangé aux grains du résidu Goldex ≤ 45 µm dans une proportion 50-50	1) D _H augmente progressivement de MNOfin-Gxfin à MNOfin-Gxgros 2) C _p et %S comparables 3) La composition de pyrite (minéralogie, taille des grains, cristallographie) est sensiblement la même dans chaque échantillon (50% MNOfin)
	MNOfin-Gxmoy		MNOfin mélangé aux grains du résidu Gx compris entre 45 µm et 75 µm dans une proportion 50-50	
	MNOfin-Gxgros		MNOfin mélangé aux grains du résidu Gx ≥ 75 µm dans une proportion 50-50	
5	MNO	S _r et degré d'oxydation	résidu MNO à différents degré de saturation	1) S _r varie progressivement 2) L'état d'oxydation entre MNO et MO est différent
	MNO sat			
	MNO sat2			
	MNO sat3			
	MO		résidu MO à différents degré de saturation	
	MO sat			
	MO sat2			
	MO sat3			

3.3 Procédures expérimentales

Cette section présente l'ensemble des essais réalisés pour ce projet, suivant les normes ASTM ou menés avec des montages expérimentaux décrits dans la littérature. La mesure des paramètres physiques, hydrogéologiques et chimiques est d'abord décrite. On explique ensuite la procédure des essais de consommation et de diffusion de l'oxygène. Enfin, nous décrivons la construction des modèles numériques servant à l'interprétation des essais de consommation et de diffusion de l'oxygène.

3.3.1 Détermination des paramètres physiques de base

Les analyses granulométriques (par sédimentométrie) ont été réalisées selon la norme ASTM D422-63 (2007). Une masse d'échantillon humide entre 50 g et 100 g, tamisée à l'aide du tamis #10 (2.0 mm), est mélangée à 125 ml d'une solution méta phosphatique (40 g.l^{-1}) et laissée au repos 24 h. Le mélange est ensuite malaxé et placé dans des cylindres gradués de 1 litre. On complète d'eau distillée jusqu'au trait de jauge. Après avoir effectué un mélange pendant une minute, on effectue une série de mesures à l'hydromètre après 0,5 ; 1 ; 2 ; 4 ; 8 ; 15 ; 30 ; 60 ; 120 ; 240 ; 480 et 1440 minutes. Un échantillon témoin est préparé pour chaque hydromètre utilisé (125 ml de solution métaphosphatique et eau distillée).

Ce type d'essai s'appuie sur la loi de Stokes pour la vitesse de sédimentation d'un grain en fonction de sa dimension (de forme parfaitement sphérique). Après la dernière mesure (1440 minutes), le cylindre est rincé et son contenu est tamisé sur la maille de $80 \mu\text{m}$ (tamis #200) pour récupérer les particules les plus grossières. Ces dernières sont séchées jusqu'à masse constante à 105°C (pendant environ 16 h). On effectue un tamisage à sec sur cette fraction plus grossière selon la norme BNQ 2501-025 (2013).

Le résultat de ce type d'analyse fournit une courbe du pourcentage de grains plus petits qu'une taille de tamis donnée. De ces résultats, on peut évaluer plusieurs caractéristiques comme (e.g. McCarthy, 2007) :

D_{10} : diamètre de tamis laissant passer 10% du matériau ;

D_{30} : diamètre de tamis laissant passer 30% ;

D_{60} : diamètre de tamis laissant passer 60% ;

C_u : coefficient d'uniformité = D_{60}/D_{10} ;

et C_c : coefficient de courbure = $(D_{30})^2/(D_{10}D_{60})$.

La densité relative des grains solides (D_r) a été mesurée selon la norme ASTM D854-14 (2014) à l'aide d'un pycnomètre. On prend environ 80 g d'échantillon par pycnomètre de 250 ml (trois mesures sont faites en parallèles) que l'on mélange avec de l'eau désaérée. Chaque pycnomètre est rempli jusqu'à environ 200 ml et placé sur un agitateur pendant 45 minutes sous vide. On complète ensuite d'eau désaérée chaque pycnomètre jusqu'au trait de jauge. Puis, trois nouveaux cycles d'agitation de 15 minutes sous vide sont lancés. Entre chaque cycle, on secoue les pycnomètres manuellement. Le but de cette manipulation est d'enlever l'air emprisonné dans l'échantillon et dissout dans l'eau pour n'avoir qu'une masse (et surtout volume) d'eau et de sol. La masse du pycnomètre comprenant l'échantillon et l'eau ainsi que la température de l'eau sont mesurées. Les pycnomètres sont calibrés, c'est-à-dire que l'on connaît leur masse emplie d'eau pour une température donnée. On peut donc en déduire la densité relative des grains solides selon l'équation suivante (ASTM D854-14, 2014) :

$$D_r = \frac{M_s}{(M_s + M_a - M_b)} \quad (3.1)$$

Où M_s est la masse sèche de l'échantillon (g) ;

M_a est la masse du pycnomètre emplie d'eau à une température donnée (g) ;

M_b est la masse du pycnomètre emplie d'eau et de matériau à une température donnée (g).

D'autres mesures de D_r ont été faites à l'UQAT, à l'aide de pycnomètres à l'hélium, conformément à la même norme ASTM D5550-06 (2006).

L'essai de compactage a été réalisé au laboratoire de géotechnique de Polytechnique Montréal, en suivant la norme de l'essai Proctor modifié (ASTM D1557-12, 2012). Il s'agit de préparer plusieurs échantillons à des teneurs en eau différentes et de mesurer leur densité en fonction de leur teneur en eau massique (e.g. McCarthy, 2007). On prépare cinq échantillons à des teneurs en eau différentes qu'on laisse reposer pendant une journée. Ensuite, chaque échantillon est placé en cinq couches dans un moule de 101.6 mm de diamètre. Chaque couche est compactée avec un marteau, pesant 44,48 N, qu'on laisse chuter librement vingt-cinq fois, d'une hauteur de

457.2 mm. L'énergie relative fournie par la compaction est de 2700 kN.m.m^{-3} . Lorsque toutes les couches ont été compactées, on égalise la surface de l'échantillon dans le moule. On mesure la masse initiale du moule (au début) et la masse finale lorsque le moule est rempli par l'échantillon. On effectue finalement une mesure de la teneur en eau de l'échantillon compacté. Avec l'ensemble de ces données (dimensions, masses, et teneur en eau), on calcule l'indice des vides e et la densité sèche du matériau ρ_d (kg.m^{-3}). On construit un graphique des valeurs de ρ_d en fonction de la teneur en eau ($w \%$).

La surface spécifique a été évaluée à l'aide de plusieurs approches, décrites par Peregoedova (2012) et présentées à la section 2.3.4.

3.3.2 Détermination des caractéristiques hydrogéologiques

Les propriétés hydrogéologiques des résidus (la conductivité hydraulique saturée k_{sat} et la courbe de rétention d'eau CRE) sont requises pour appliquer le logiciel Vadose/W décrit plus loin dans ce chapitre.

La conductivité hydraulique saturée k_{sat} est mesurée par un essai à charge variable en cellule triaxiale (perméamètre à paroi flexible) selon la norme ASTM D5084-10 (2000); le montage est schématisé à la figure 3.1. On prépare un échantillon de forme cylindrique qu'on recouvre d'une membrane imperméable. On le place dans une cellule triaxiale entre deux géotextiles qui communiquent avec une pierre poreuse et les réservoirs amont et aval. La cellule est emplie d'eau et fermée hermétiquement. On applique une contrepression hydrostatique pour saturer l'échantillon et une pression de confinement pour provoquer un écoulement. La mise sous pression de confinement de l'échantillon se fait par pallier pour éviter d'appliquer une contrainte trop élevée trop brusquement (ASTM D5084-10). La mise sous pression permet de comprimer puis dissoudre la totalité des bulles d'air emprisonnées dans le résidu. On considère cet objectif atteint si le degré de saturation est compris entre 95 % et 105 % (ASTM D5084-10).

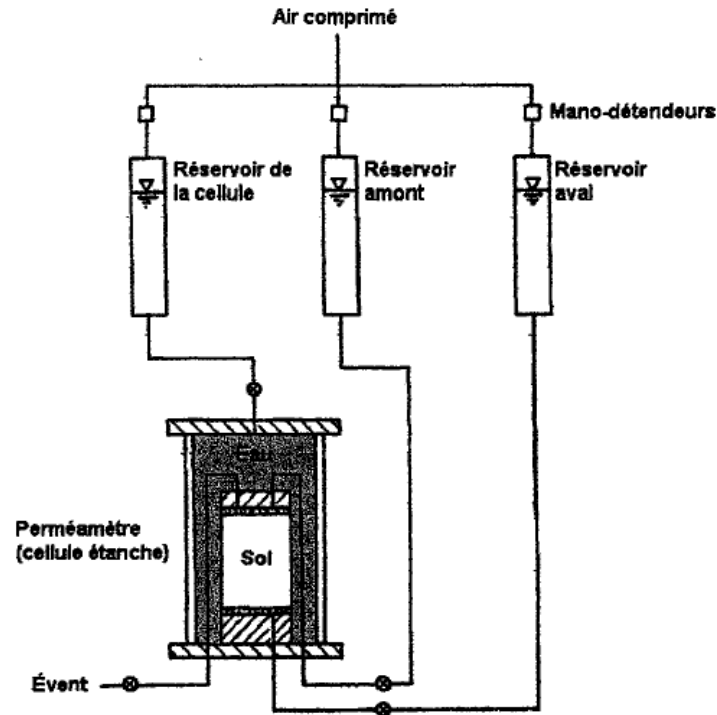


Figure 3.1 : Schéma d'une cellule triaxiale (Martin, 2004).

Lorsque la préparation et le montage de l'éprouvette saturée est terminée, un essai à charge variable est alors effectué. L'eau provenant d'une burette graduée circule à travers l'échantillon et ressort dans une autre burette graduée. Le flux d'eau à travers l'échantillon au cours de cet essai se fait de haut en bas. On note les variations de la charge en fonction du temps. L'interprétation de l'essai à charge variable repose sur la formule suivante (Freeze et Cherry, 1979) :

$$k_{\text{sat}} = \frac{aL}{2At} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (3.2)$$

Avec a (L^2) la surface de la burette amont

L (L) la hauteur de l'échantillon,

A (L^2) la section de l'échantillon,

h_1 (L) la charge au temps t_1 ,

h_2 (L) la charge au temps t_2 ,

t (T) le temps entre deux mesures

Les valeurs mesurées de la conductivité hydraulique saturée sont comparées aux valeurs prédites par les modèles de Kozeny Carman (KC) (Chapuis et Aubertin, 2003) et Kozeny-Carman modifié (KCM ; Mbonimpa et al., 2002), présentés au chapitre 2 (voir section 2.2.1).

La CRE a été mesurée à l'aide de cellules TEMPE modifiées, selon le protocole développé à Polytechnique Montréal par Aubertin et al. (1995, 1997) et mis à jour par Pabst (2011). Cet essai est schématisé à la figure 3.2. Les deux principaux résidus MNO et Gx ont été testés. Un échantillon saturé en cellule triaxiale est installé dans la cellule TEMPE. On scelle ce dispositif au sein d'un cylindre métallique de confinement. On injecte un gaz sous pression (de l'air comprimé ou de l'azote si le résidu est réactif) dans la cellule et on augmente la pression exercée par paliers (allant de 0 kPa à 700 kPa par exemple pour le résidu MNO). Des pierres poreuses (céramiques) sont placées au-dessus et au-dessous du résidu ; ceci permet de répartir uniformément la pression exercée dans l'échantillon. Chaque palier de pression exercée entraîne l'évacuation d'une certaine quantité d'eau au bas de la cellule (pendant environ 48 heures dans le cadre de nos essais). On mesure la masse (avec une précision de 0,1 g) de la cellule lorsque cet équilibre est atteint, afin de déterminer la masse d'eau évacuée. On calcule ensuite la teneur en eau volumique θ_w du matériau pour une pression (suction Ψ) donnée.

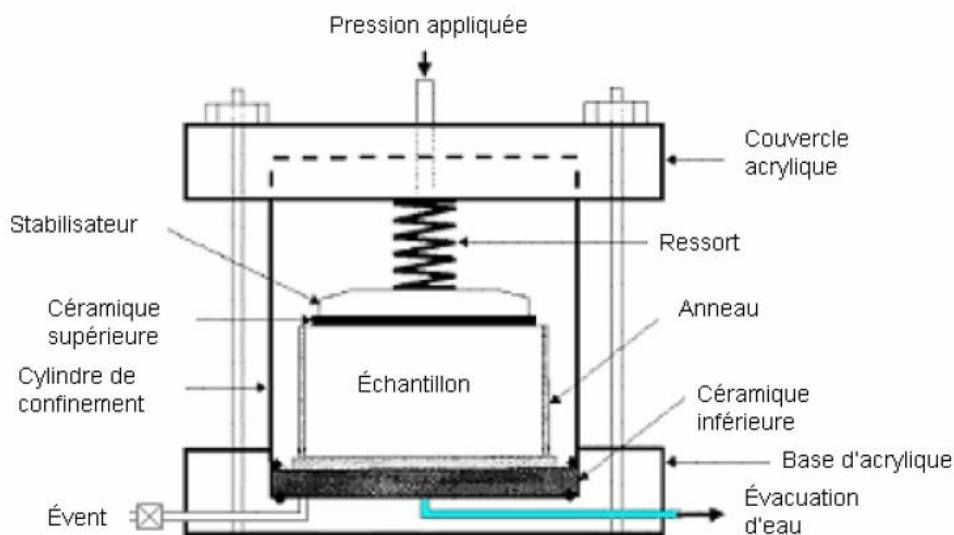


Figure 3.2 : schéma d'une cellule TEMPE, Martin, 2004.

Les résultats expérimentaux sont comparés aux CRE estimées par le modèle de Kovacs modifié (MK) (Aubertin et al., 1998, 2003); les valeurs expérimentales sont aussi lissées à l'aide de l'équation de van Genuchten (1980). Ces modèles sont présentés à la section 2.2.3.

3.3.3 Détermination des caractéristiques chimiques et minéralogiques

Des analyses à la fournaise LÉCO ont été effectuées au laboratoire de géochimie de Polytechnique Montréal afin d'évaluer les teneurs en carbone et soufre totaux des résidus et mélanges. Le soufre ainsi détecté peut inclure les sulfates, les sulfures ou le soufre natif.

Quelques grammes de résidus sont placés dans un petit contenant inséré au four permettant la volatilisation des solides, incluant le carbone et le soufre. Les gaz sont conduits vers une chambre permettant une analyse spectrométrique à infrarouge par adsorption des longueurs spécifiques au carbone et au soufre (Pabst, 2011).

Des analyses minéralogiques plus détaillées ont été menées à l'UQAT à l'aide de la diffraction des rayons X (DRX). Cette technique permet la quantification des minéraux (sulfatés, sulfurés et autres) requise pour une analyse des réactions d'oxydation (Villeneuve, 2004).

Des analyses LÉCO et DRX ont été faites avant et après certains essais de consommation de l'oxygène. Cela permet d'analyser l'évolution au sein d'un échantillon.

3.3.4 Essais de diffusion de l'oxygène

L'essai de diffusion de l'oxygène suit la méthode décrite par Aubertin et al. (1995, 1999, 2000), Aachib et al. (2002, 2004) et Mbonimpa et al. (2003). Le dispositif est illustré à la figure 3.3. Le test se réalise au sein d'une cellule en plexiglas qui possède deux réservoirs à gaz : un supérieur et un inférieur. Un échantillon de résidu est disposé au centre de la cellule (entre les deux réservoirs) par-dessus une couche de sable densifié (d'environ deux centimètres). Ce résidu est préparé avec une teneur en eau massique fixée a priori, puis densifié pour obtenir l'indice des vides et le degré de saturation souhaités. On s'assure que les deux matériaux (résidus et sable) ont des granulométries suffisamment différentes pour obtenir un effet de barrière capillaire qui empêchera la désaturation du résidu. Chaque réservoir est équipé de sondes à fibres optiques (Oxygen Dipping Probe DP-PSt3), reliés à un acquisateur de données (OXY-10, 10-Channel Oxygen Meter). Après une purge complète de la cellule à l'azote, l'un des deux réservoirs est rempli d'air. Les gaz circulent d'abord dans une colonne d'eau (avant d'être dirigés vers la cellule) afin qu'ils soient saturés d'humidité (pour limiter l'évaporation). On ferme ensuite hermétiquement la cellule. L'oxygène diffuse naturellement du réservoir avec la concentration en

oxygène la plus élevée vers celui où la concentration est la plus faible. Cette diffusion moléculaire se fait au travers du résidu.

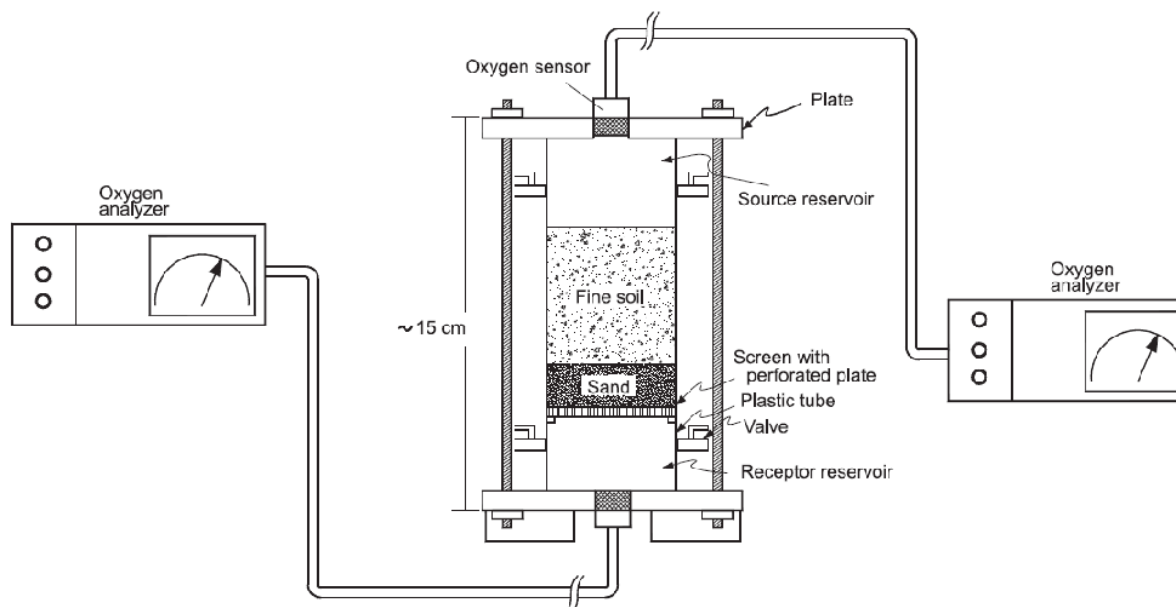


Figure 3.3 : Représentation schématique d'une cellule de diffusion (Aubertin et Mbonimpa, 1999; Mbonimpa et al., 2012)

On obtient par l'intermédiaire des capteurs deux courbes de l'évolution de la concentration en oxygène en fonction du temps. On procède ensuite à des modélisations à l'aide d'un code numérique (i.e. : POLLUTE et Vadose/W – voir sections 2.4 et 3.3.6) qui solutionne les lois de Fick (présentées à la section 2.3.1). À partir des caractéristiques de la cellule, du sable et du résidu, on simule l'évolution de la concentration en oxygène en fonction du temps pour des coefficients de diffusion variables. On procède par itération en répétant les simulations pour différentes valeurs de D_e . La valeur « expérimentale » du coefficient de diffusion D_e est obtenue lorsque la courbe obtenue par modélisation se superpose à la courbe mesurée. Afin de vérifier et valider la valeur ainsi obtenue, on compare les valeurs expérimentales à celles calculées à partir du modèle prédictif de Achib et al. (2004), présenté à la section 2.3.2.

3.3.5 Essais de consommation de l'oxygène

L'essai de consommation de l'oxygène est un essai qui a été développé à partir de l'essai en cellule de diffusion (Gosselin, 2007). Une cellule en plexiglas est dotée d'un seul réservoir à gaz. Au fond de cette cellule, on place un échantillon de résidu réactif. Ce résidu humide est densifié afin

d'obtenir l'indice des vides et le degré de saturation désirés. Le réservoir, doté d'un capteur d'oxygène, est ensuite rempli d'azote. La cellule est fermée hermétiquement durant 24h, afin de vérifier s'il y a des fuites. Elle est ensuite remplie d'oxygène et refermée. La décroissance de la concentration en oxygène, qui est alors essentiellement liée à la réaction d'oxydation de la pyrite, est mesurée.

On procède ensuite à des modélisations à l'aide d'un code numérique (ici POLLUTE de Rowe et al., 1994 et Vadose/W de Geostudio (GeoSlope Inc. ; version 7.2.1, 2007) qui solutionne les lois de Fick (présentées à la section 2.3.1). À l'aide des caractéristiques de la cellule et du résidu, on simule l'évolution de la concentration en oxygène en fonction du temps pour des coefficients de diffusion D_e et des coefficients du taux de réaction K_r variables. On procède à nouveau par itération. La valeur du coefficient de diffusion D_e et celle du coefficient du taux de réaction K_r sont obtenues lorsque la courbe obtenue par modélisation se superpose à la courbe expérimentale. Afin de valider ces valeurs « expérimentales », on les compare à celles obtenues du modèle prédictif de Aachib et al. (2004) pour D_e (section 2.3.2) et celui de Collin (1987) pour K_r (section 2.3.3).

La figure 3.4 présente l'ensemble du montage pour les essais de consommation (cellules, système d'acquisition, sondes, colonne d'eau pour la saturation des gaz). Chaque capteur a été calibré selon les recommandations du fournisseur (i.e. à 21% et 0% d'oxygène).

Un gros travail a été requis pour améliorer l'étanchéité des cellules de consommation car plusieurs fuites ont eu lieu lors des premières mesures. Plusieurs essais ont aussi dû être répétés. Avec l'expérience, le matériel utilisé pour les scellages hermétiques et les types de connexions a été adapté, et le système a permis la réalisation d'essais fiables.

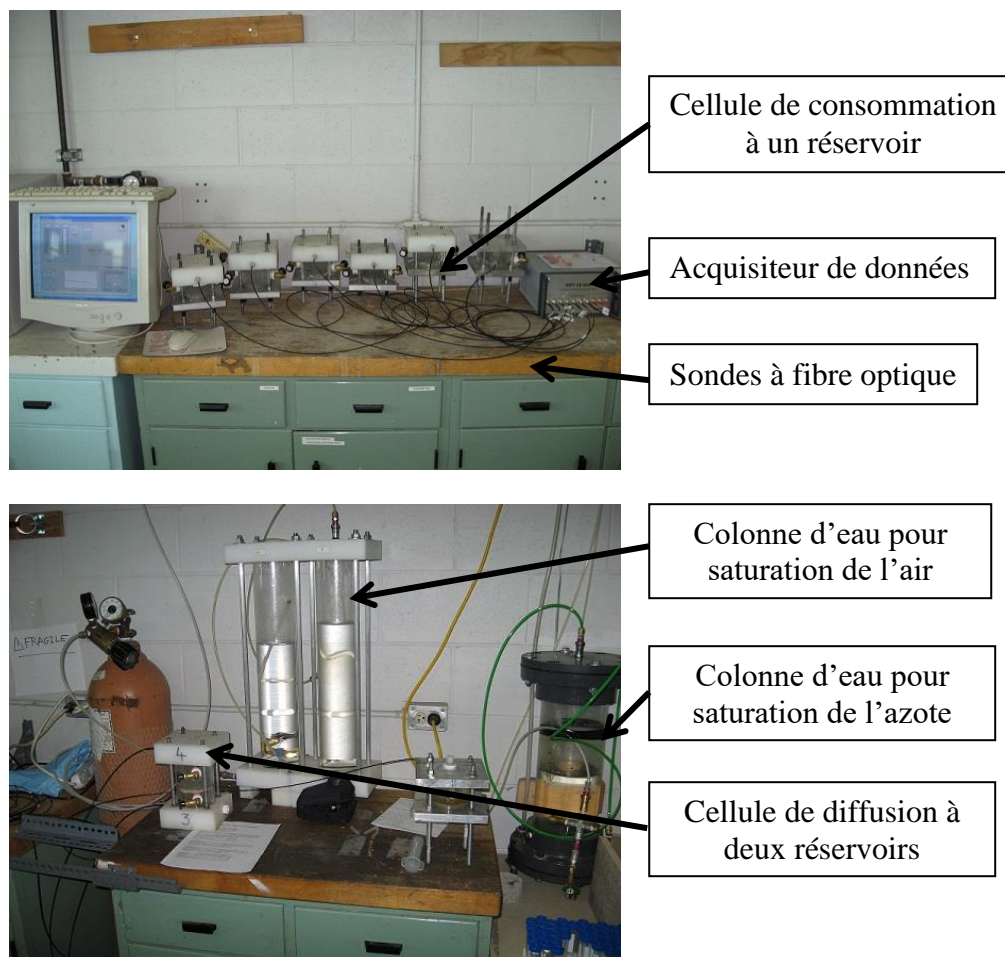


Figure 3.4 : Photos de l'ensemble du montage des essais de consommation et diffusion, (Toussaint, 2010)

3.3.6 Construction des modèles numériques

Essais de diffusion et consommation de l'oxygène

Tel que mentionné plus haut, les essais de diffusion de l'oxygène ont été interprétés à l'aide des codes numériques POLLUTE (Rowe et al., 1994) et Vadose/W (Geostudio, GeoSlope Inc. ; version 7.2.1, 2007), présentés à la section 2.4.

Le modèle construit pour le logiciel POLLUTE (Rowe et al., 1994) inclut le résidu, le sable et les masses de gaz au sein de la cellule (réservoirs supérieur et inférieur) (tableau 3.2). Pour chacune de ces parties, on précise le nombre de sous-couches (une seule pour nos essais) ainsi que l'épaisseur et la masse volumique (ou densité) sèche des matériaux mesurées lors de la mise en

place. La porosité équivalente θ_{eq} est aussi entrée dans le modèle afin de prendre en compte l'oxygène présent dans les deux phases du milieu (liquide et gazeuse, éq. 2.39)

Le coefficient de diffusion apparent D_e^* (éq. 2.38) est également spécifié dans le modèle.

Tableau 3.2 : Valeurs des paramètres utilisés pour le modèle qui simule les essais de diffusion de l'oxygène avec le logiciel POLLUTE (de Rowe et al., 1994)

Matériau	Nombre de sous couches	Épaisseur (m)	Masse volumique sèche ρ_d (kg.m ⁻³)	Porosité équivalente θ_{eq} (-)	Coefficient de diffusion effectif D_e^* (m ² .an ⁻¹)
Réservoir supérieur	1	Valeur mesurée	masse volumique de l'air	1	Coefficient de diffusion de l'oxygène libre dans l'air D_a^0 (section 2.3.2)
résidu	1	Valeur mesurée	Valeur mesurée	éq. 2.39 avec valeurs mesurées	éq. 2.38 avec valeurs mesurées
sable	1	Valeur mesurée	Valeur mesurée	éq. 2.39 avec valeurs mesurées	éq. 2.38 avec valeurs mesurées
Réservoir inférieur	1	Valeur mesurée	Masse volumique de l'air	1	Coefficient de diffusion de l'oxygène libre dans l'air D_a^0 (section 2.3.2)

Les conditions frontières imposées sont : « pas de flux » au sommet et à la base du montage. Nous avons choisi les options « Special features » avec : « Radiobiological decay » et « Initial concentration profile »; ceci permet de fixer le temps de demi-vie du résidu réactif (décrit à la section 2.4, éq. 2.59) et de définir la concentration d'oxygène initiale dans chaque composante du modèle. Le logiciel considère que les pores du résidu et du sable sont initialement vides (i.e. sans oxygène), mais ceci n'est pas totalement représentatif. Lorsque l'essai commence, il simule donc une diffusion instantanée de l'oxygène présent dans le réservoir source vers les pores de ces matériaux. Pour pallier à ce problème, on augmente la concentration d'oxygène initiale selon la procédure décrite par Gosselin (2007). On fixe les paramètres de calcul (i.e. unités, pas de

temps). Le calcul numérique donne des valeurs de concentration en oxygène en fonction du temps. Ces valeurs sont comparées aux valeurs mesurées. On ajuste les paramètres D_e et K_r itérativement jusqu'à ce que les valeurs mesurées et calculées numériquement soient pratiquement égales (selon un ajustement visuel).

Le logiciel Vadose/W (Geostudio, GeoSlope Inc. ; version 7.2.1, 2007) est un code de calcul par éléments finis, et il est plus élaboré que POLLUTE. Le modèle conceptuel reste toutefois le même (réservoir supérieur, résidu, sable, réservoir inférieur); on fixe également les épaisseurs des composantes. Les paramètres hydrogéologiques de chaque matériau (sable et résidu), déterminés à l'aide des modèles prédictifs décrits à la section 2.2, doivent aussi être entrés dans le logiciel. La valeur du taux de réaction est directement fixée dans les paramètres du résidu.

Nous avons créé trois étapes de calcul, décrites dans le tableau 3.3 avec les conditions frontières associées. La teneur en eau initiale (basée sur la valeur expérimentale) est fixée à partir d'une pression initiale prédéterminée (condition frontière).

Le maillage construit pour la simulation comporte des éléments rectangulaires dont la taille (usuellement 3 mm) est définie selon la procédure décrite par Chapuis (2012). La méthode s'appuie sur l'observation de la courbe de conductivité hydraulique non saturée. Un maillage adéquat facilite la convergence des calculs numériques.

Tableau 3.3 : Résumé des étapes de calculs et des conditions frontières imposées pour simuler les essais de diffusion et consommation d'oxygène avec le code Vadose/W (Geostudio, GoSlope Inc. ; version 7.2.1, 2007) ; la température est constante (20°C) pour ces essais.

Étape	État	Description de l'étape	Conditions frontières		Durée du calcul
			Hydraulique	Gaz	
1	Stationnaire	Correspond à la recherche de fuite par l'azote	Pression initiale : déterminée à partir de la CRE et ajustée itérativement pour θ_w	Concentration d'oxygène nulle	Quelques secondes
2	Transitoire	Correspond au remplissage de la cellule avec l'oxygène, juste avant le démarrage de l'essai		Concentration d'oxygène constante au bas et au sommet de la couche d'air, correspondant à la lecture du capteur lors de l'essai	Quelques minutes, afin que le réservoir d'air atteigne la concentration désirée
3	Transitoire	Correspond à l'essai		Pas de conditions. Reprend les résultats des calculs de l'étape précédente.	Durée de l'essai

Essais de consommation de l'oxygène :

Le modèle utilisé pour simuler les essais de consommation de l'oxygène avec les codes POLLUTE (Rowe et al., 1994) et Vadose/W (Geostudio, GeoSlope Inc.; version 7.2.1, 2007) est composé de deux portions : le résidu réactif et le réservoir à gaz. Son élaboration (i.e. caractéristiques entrées ou estimées, étapes de calculs, conditions frontières) se fait de la même manière que celle concernant les essais de diffusion de l'oxygène. D'autres informations sont fournies par Gosselin (2007).

3.3.7 Évaluation des incertitudes

Certaines incertitudes affectent les mesures effectuées suite à la mise en place des échantillons dans les cellules de diffusion et de consommation de l'oxygène. Elles peuvent toucher différentes mesures :

- La teneur en eau, obtenue par différence de masse avant et après séchage au four.
- La masse du résidu, obtenue par différence de masse entre le dispositif vide et contenant l'échantillon.
- Le diamètre de la cellule, et donc de l'échantillon, obtenu à l'aide d'une mesure au vernier.
- L'épaisseur de l'échantillon, qui est obtenue :
 - i) dans la cellule de diffusion par différence entre la hauteur, mesurée au vernier, de la couche de sable et celle du résidu
 - ii) dans la cellule de consommation par différence entre la hauteur, mesurée au vernier, de la couche de résidu et celle de la cellule vide

Ces différentes mesures permettent d'obtenir l'ensemble des caractéristiques physiques de l'échantillon (volume, porosité, densité, teneur en eau, degré de saturation, etc.). Ces paramètres sont essentiels pour interpréter les essais. Leur variation entraîne une variation des résultats pour l'obtention du coefficient de diffusion effectif (D_e) et du taux de réaction (K_r) obtenus des simulations avec POLLUTE (Rowe et al., 1994) et Vadose/W (Geostudio, GeoSlope Inc.)

Les pesées étant effectuées avec une balance de précision, nous avons considéré que les imprécisions de mesures sont minimales dans ce cas.

Le diamètre est mesuré plusieurs fois au vernier et une moyenne est calculée. Les écarts étant très faibles entre chaque mesure (inférieurs au millimètre), nous avons considéré que l'erreur (imprécision induite) est minime.

Pour déterminer une hauteur (ou épaisseur), quatre mesures sont faites au vernier à partir d'un point de référence telle la base (cellule, sable, résidu) jusqu'au sommet de la cellule. Comme les éprouvettes mises en place dans les cellules ne sont pas parfaitement uniformes, une moyenne est calculée à partir de ces quatre mesures. Nous obtenons ainsi une hauteur moyenne de la cellule vide et l'épaisseur du sable (dans le cas de la diffusion) et du résidu. Bien que l'échantillon (sable

ou résidu) soit mis en place minutieusement, il est difficile d'obtenir une surface parfaitement plane. Cela peut engendrer des écarts non négligeables entre les différentes mesures de hauteur (supérieurs au millimètre). Nous avons considéré que cette imprécision est la plus importante et qu'elle domine largement au niveau des imprécisions expérimentales. Cette imprécision sera évaluée dans la suite des analyses.

À cette fin, nous avons défini un intervalle des valeurs des épaisseurs mesurées pour chaque essai, à partir des mesures de hauteurs. Les paramètres physiques du résidu sont calculés à partir des bornes de cet intervalle. Par exemple, pour la borne inférieure de l'épaisseur (i.e. valeur la plus faible), nous obtenons les valeurs des bornes supérieures de porosité (n), teneur en eau (θ_w), densité sèche (ρ_d) et degré de saturation (S_r) ; nous obtenons alors également les bornes inférieures des valeurs prédites des coefficients de diffusion effectif D_e et du taux de réaction K_r . L'inverse se produit dans le cas de la borne supérieure de l'épaisseur (i.e. plus grande valeur mesurée), qui mène à la borne inférieure des valeurs associées (i.e. n , θ_w , ρ_d , S_r , ainsi que D_e et K_r prédites). Ces valeurs moyennes et extrêmes sont entrées dans le modèle construit avec le logiciel POLLUTE. Les calculs numériques fournissent alors les bornes de valeurs expérimentales des coefficients de diffusion D_e et du taux de consommation K_r .

CHAPITRE 4 PRINCIPAUX RÉSULTATS

Ce chapitre présente les principaux résultats des essais décrits au chapitre 3; certains résultats complémentaires sont inclus en annexe. Les résultats incluent ceux des essais menés sur les résidus miniers des sites Manitou et Goldex, ainsi que les divers mélanges (i.e. séries 1 à 5, définies au tableau 3.1).

4.1 Caractérisation physique de base

Les valeurs expérimentales obtenues pour les paramètres physiques de base sont présentées dans cette section. Ceci inclut la granulométrie, la surface spécifique, les paramètres de compaction ainsi que la densité relative des grains solides (D_r) avant et après les essais de consommation d'oxygène.

4.1.1 Granulométrie

La figure 4.1 présente les courbes granulométriques des résidus MO, MNO et Gx avant les essais. Les figures 4.2 à 4.5 montrent les courbes des différents mélanges pour les séries 1 à 4. Le tableau 4.1 résume les principales caractéristiques granulométriques de ces échantillons. Les valeurs de D_H dans ce tableau sont calculées selon l'équation 2.50 (Aubertin et al. 1998).

Les différents résidus sont classés en deux types selon la classification unifiée des sols USCS (ASTM D2487, 2011). Les résidus MO et MNOgros sont des sables silteux (SM) ; leurs granulométries sont relativement grossières pour des résidus miniers. Les limites d'Atterberg n'ont pu être déterminées sur ces matériaux (non plastiques). Les autres résidus ont une granulométrie plus fine et sont également non plastiques; ils sont donc classés comme des silts inorganiques peu plastiques (ML).

On note aussi que les résidus MNO et Gx ont des granulométries très similaires (avec un C_U , un D_{10} et un D_H très proches). Ceci justifie le mélange des résidus Gx et MNO pour évaluer l'effet de la minéralogie, pour une granulométrie comparable. Ces résidus montrent des valeurs typiques de D_{10} (soit entre 0,001 et 0,004 mm), D_{60} (entre 0,01 et 0,05 mm) et C_U (entre 8 et 18) que l'on retrouve dans la littérature (Aubertin et al., 2002 ; Bussière, 2007).

La série 1 des mélanges des résidus MNO et Gx comporte différentes proportions (MNO28, MNO50, MNO73) définies au tableau 3.1 (section 3.2). La figure 4.2 montre que les courbes granulométriques de ces mélanges sont très proches; les valeurs de D_H varient de $8,13 \times 10^{-3}$ mm à $9,27 \times 10^{-3}$ mm (voir tableau 4.1). Les résidus MO et MNO présentent une différence granulométrique importante. Cela n'est pas anormal pour un site d'entreposage ayant reçu des résidus de diverses sources et qui présente donc de grandes hétérogénéités (Pabst, 2011).

Pour la série 2 (MNOfin, MNOmoy, MNOgros, tableau 4.1), les échantillons ont été obtenus par séparation granulométriques du résidu MNO par voie humide avec les tamis de taille 45 μ m et 75 μ m ; les courbes granulométriques et les paramètres correspondants sont alors différents. La figure 4.3 montre la répartition des classes granulométriques pour MNOfin (particules de taille inférieure à 45 μ m), MNOmoy (particules comprises entre 45 μ m et 75 μ m) et MNOgros (particule de taille supérieure à 75 μ m). On remarque que les bornes granulométriques recherchées ici (i.e. $< 45\mu$ m ; 45μ m $< x < 75\mu$ m ; $> 75\mu$ m) ne sont pas totalement respectées (i.e. MNOmoy n'est pas composé uniquement de particules comprises entre 45 μ m et 75 μ m , voir fig. 4.3). Cela est surtout lié à l'agglomération de particules fines sur les particules plus grossières. Ce phénomène, aussi décrit par Nicholson (1994), est discuté dans la section 5.4. Néanmoins, ces trois échantillons présentent des caractéristiques granulométriques bien distinctes (conformément à l'objectif visé). On note la présence relativement abondante de particules très fines (environ 65% inférieure à 45 μ m) dans la fraction MNOmoy. On remarque aussi la présence de ces particules très fines (14% inférieure à 45 μ m) et fines (20% comprise entre 45 μ m et 75 μ m) dans la fraction MNOgros. Des particules fines (environ 20% compris entre 45 μ m et 75 μ m) se retrouvent dans la fraction MNOfin. Les trois résidus de la série 2 montrent des valeurs de D_H variant de $4,43 \times 10^{-3}$ mm à $5,00 \times 10^{-2}$ mm.

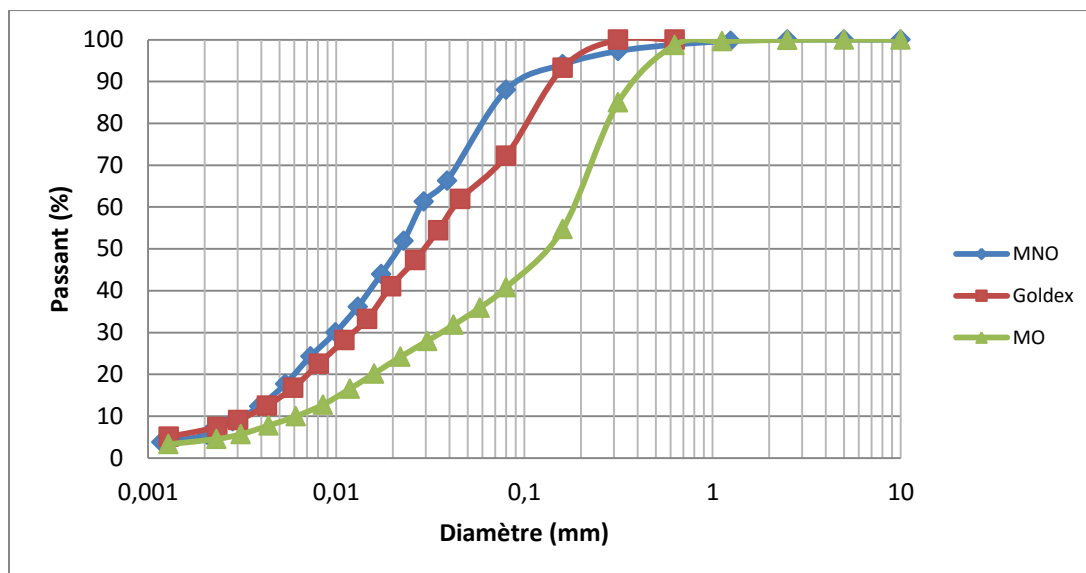


Figure 4.1 : Courbes granulométriques des échantillons de résidus Manitou non oxydé (MNO), Manitou oxydé (MO) et Goldex (tableau 4.1)

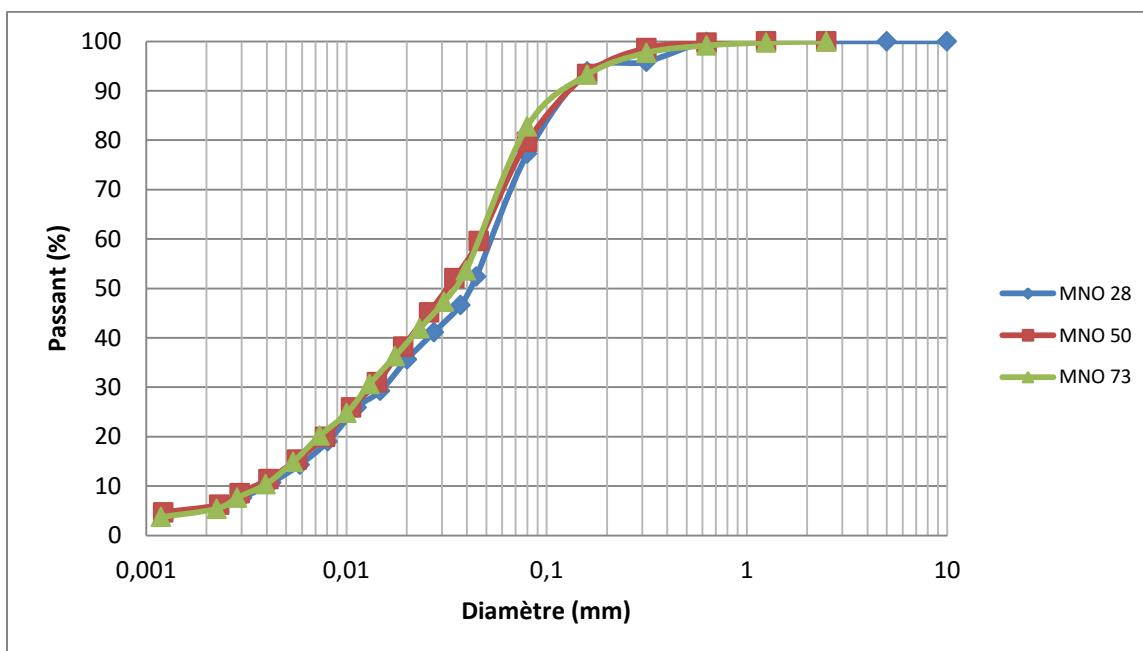


Figure 4.2 : Courbes granulométriques des mélanges de la série 1 (i.e. MNO28, MNO50, MNO73 ; tableau 4.1) utilisés pour évaluer l'effet de la teneur en pyrite.

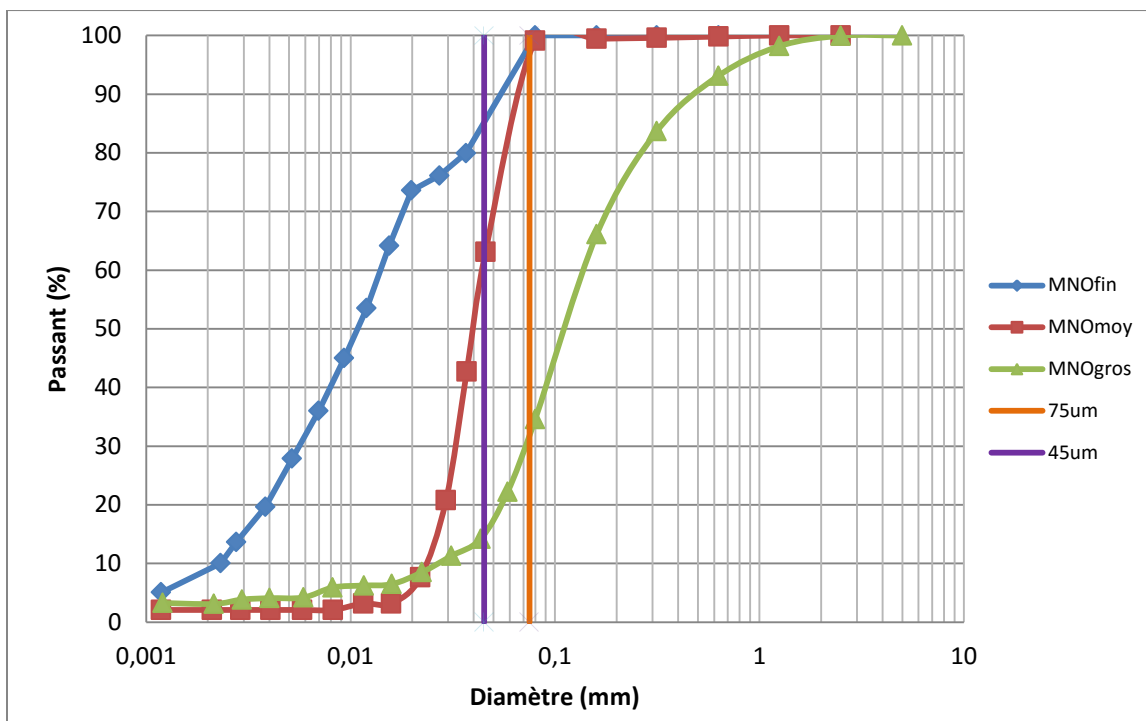


Figure 4.3 : Courbes granulométriques des mélanges de résidus de la série 2 (MNOfin, MNOmoy, MNOgros ;tableau 4.1) utilisés pour évaluer l'effet du diamètre équivalent.

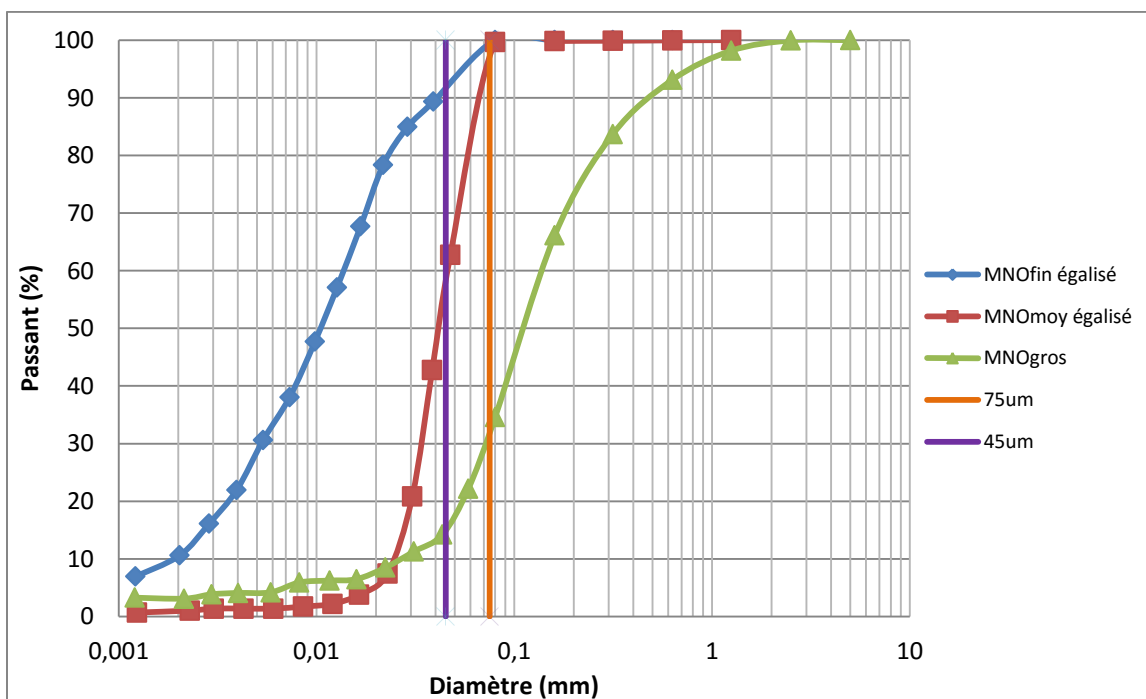


Figure 4.4 : Courbes granulométriques des mélanges de résidus de la série 3 (MNOfin égalisé, MNOmoy égalisé, MNOgros ; tableau 4.1) utilisés pour évaluer l'effet du diamètre équivalent.

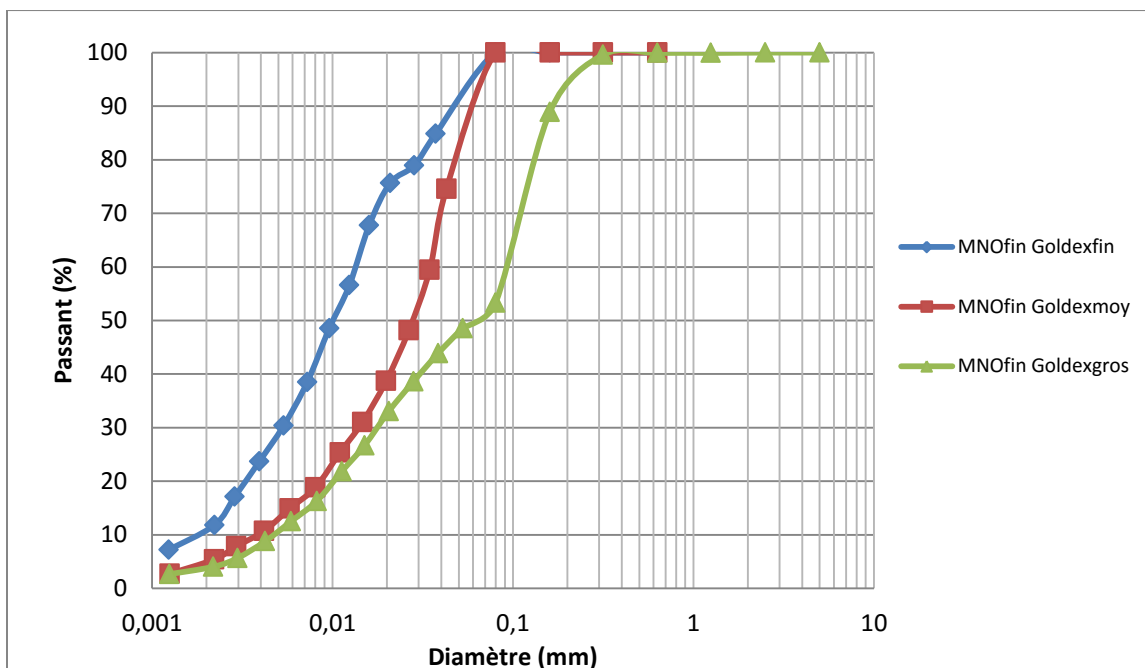


Figure 4.5 : Courbes granulométriques des mélanges de résidus de la série 4 (MNOfin Gxfin, MNOfin Gxmoy, MNOfin Gxgros ; tableau 4.1) utilisés pour évaluer l'effet du diamètre équivalent.

Tableau 4.1 : Principales caractéristiques granulométriques des résidus et des mélanges (séries 1 à 4)

Échantillons		D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u	C _c	D _H (mm)	Classification UCSC
Résidus	MNO	0,0032	0,0099	0,0215	0,0283	8,8	1,1	6,75×10 ⁻³	ML
	MO	0,0061	0,0366	0,1329	0,1870	30,6	1,2	1,67×10 ⁻²	SM
	Gx	0,0034	0,0123	0,0295	0,0429	12,7	1,1	7,71×10 ⁻³	ML
Série 1	MNO 28	0,0040	0,0154	0,0415	0,0554	14,0	1,1	9,27×10 ⁻³	ML
	MNO 50	0,0035	0,0135	0,0321	0,0466	13,3	1,1	8,13×10 ⁻³	ML
	MNO 73	0,0038	0,0127	0,0345	0,0484	12,7	0,9	8,73×10 ⁻³	ML
Série 2	MNO fin	0,0023	0,0056	0,0109	0,0141	6,1	1,0	4,43×10 ⁻³	ML
	MNOmoy	0,0233	0,0325	0,0401	0,0444	1,9	1,0	3,09×10 ⁻²	ML
	MNOgros	0,0270	0,0720	0,1191	0,1444	5,3	1,3	5,00×10 ⁻²	SM
Série 3	MNOfin égalisé	0,0019	0,0053	0,0105	0,0138	7,3	1,1	3,81×10 ⁻³	ML
	MNOmoy égalisé	0,0243	0,0338	0,0417	0,0462	1,9	1,0	3,23×10 ⁻²	ML
Série 4	MNOfin Gxfin	0,0018	0,0053	0,0101	0,0135	7,4	1,1	3,68×10 ⁻³	ML
	MNOfin Gxmoy	0,0039	0,0140	0,0277	0,0348	9,0	1,5	8,17×10 ⁻³	ML
	MNOfin Gxgros	0,0048	0,0179	0,0611	0,0950	20,0	0,7	1,20×10 ⁻²	ML

La série 3 comporte des fractions de MNO égalisées (pour des teneurs en pyrite similaires, voir tableau 4.13 à la section 4.3.2) obtenues par le mélange des fractions du résidu MNO avec les fractions de même taille du résidu Gx (i.e. : MNO_{moy} avec Gx_{moy}), comme défini dans tableau 3.1. Tout comme pour la série 2, on remarque que les bornes granulométriques initialement visées (i.e. $< 45 \mu\text{m}$; $45 \mu\text{m} < x < 75 \mu\text{m}$; $> 75 \mu\text{m}$) ne sont pas respectées (i.e. MNO_{moy} égalisé n'est pas composé uniquement de particules comprises entre $45 \mu\text{m}$ et $75 \mu\text{m}$, voir fig. 4.4). Tel que mentionné plus haut, ceci serait dû principalement à l'agglomération de particules fines sur les particules plus grossières (voir section 5.4). On note que la proportion de particules fines entre $45 \mu\text{m}$ et $75 \mu\text{m}$ est de 10% environ dans MNO_{fin} égalisé. Les valeurs de D_H varient de $3,81 \times 10^{-3} \text{ mm}$ à $5,00 \times 10^{-2} \text{ mm}$. L'évaluation de la surface spécifique et de la minéralogie est toutefois nécessaire pour conclure sur l'atteinte des objectifs visés pour ces mélanges (i.e. obtenir trois mélanges avec des teneurs en pyrite similaires et des granulométries différentes comme défini dans la section 3.2) ; ces informations sont présentées plus loin.

La série 4 a été obtenue en mélangeant dans les mêmes proportions la fraction très fine ($< 45 \mu\text{m}$) du résidu MNO et les différentes portions du résidu Gx (i.e. : 50% MNO_{fin} et 50% des résidus tel Gx_{moy}). Les caractéristiques de ces mélanges varient de façon notable. Par exemple, les valeurs de C_U sont comprises entre 7,4 et 20, C_c varie entre 0,7 et 1,5, la valeur de D_H est entre $3,68 \times 10^{-3} \text{ mm}$ et $1,20 \times 10^{-2} \text{ mm}$. L'investigation minéralogique est nécessaire pour conclure sur l'atteinte des objectifs visés par les mélanges de la série 4 (i.e. obtenir trois échantillons avec la même composition minéralogique et des granulométries différentes, comme défini dans la section 3.2 ; ces informations sont aussi présentées plus loin.

Rappelons que la série 5 (non présentée ici) est composée d'échantillons de MNO et MO à différents degrés de saturation S_r ; ils ont donc les mêmes caractéristiques granulométriques que les résidus MO et MNO.

Surface spécifique

Les surfaces spécifiques des résidus et mélanges ont été évaluées à partir des paramètres granulométriques, selon trois approches décrites par Peregoedova (2012) ; elles sont présentées dans la section 2.3.4 – voir équations 2.53 à 2.57 (pour les méthodes de Chapuis et Légaré, 1992, qui sert ici de référence, et selon le modèle MK présenté par Aubertin et al., 2003 (équ. 2.56) et le

modèle KCM présenté par Mbonimpa et al., 2002 (éq. 2.57) ; un coefficient de forme $\alpha = 6$ (sphères) a été utilisé ici pour ces 3 modèles.

Les résultats sont présentés dans le tableau 4.2. On remarque une différence notable entre la valeur de S_s calculée selon l'approche de Chapuis et Légaré (1992) pour les résidus MNO et Gx (312-337 m^2/kg) et celle du résidu MO (204 m^2/kg). Cela s'explique par la différence granulométrique, précédemment observée.

Les échantillons de la série 1 ont des S_s comparables (valeurs comprises entre 279 et 308 m^2/kg selon l'approche de Chapuis et Légaré, 1992), ce qui correspond à l'un des objectifs visés, afin d'évaluer spécifiquement l'effet de la teneur en pyrite.

Pour la série 2, on note des valeurs de 452 m^2/kg pour MNOfin, 135 m^2/kg pour MNOgros et 120 m^2/kg pour MNOmoy (selon la méthode Chapuis et Légaré 1992). La tendance concorde avec les observations granulométriques; la présence de particules fines dans l'échantillon MNOgros augmente la surface spécifique.

Tableau 4.2 : Valeurs des surfaces spécifiques S_s des divers résidus et mélanges, calculées selon les modèles décrits à la section 2.3.4, pour un coefficient de forme $\alpha = 6$

Échantillons		S_s (m^2/kg)		
		Chapuis et Légaré (1992) éq. 2.54 et 2.55	Modèle MK (Aubertin et al., 2003) éq. 2.56	Modèle KCM (Mbonimpa et al., 2002) éq. 2.57
Résidus	MNO	312	287	420
	MO	204	129	199
	Gx	337	282	423
Série 1	MNO 28	279	225	340
	MNO 50	308	254	382
	MNO 73	284	229	344
Série 2	MNOfin	452	433	614
	MNOmoy	120	63	75
	MNOgros	135	41	57
Série 3	MNOfin égalisé	518	528	762
	MNOmoy égalisé	90	62	74
Série 4	MNOfin Gxfin	537	558	806
	MNOfin Gxmoy	276	251	368
	MNOfin Gxgros	225	172	264

Les mélanges de la série 3 (fractions MNOfin égalisé, MNOmoy égalisé) montrent des résultats concordant avec ceux de la série 2. Pour la fraction fine, la valeur de la surface spécifique est plus élevée (518 m²/kg pour MNOfin égalisé contre 452 m²/kg pour MNOfin, selon l'approche de Chapuis et Légaré, 1992). Pour la fraction moyenne, c'est l'inverse (90 m²/kg pour MNOmoy égalisé contre 120 m²/kg pour MNOmoy).

La série 4 (mélanges entre MNOfin et diverses classes granulométriques de Gx) montre une diminution progressive de la valeur de la surface spécifique (selon l'approche de Chapuis et Légaré 1992) lorsque la taille des grains augmente. On obtient une valeur de 537 m²/kg pour le mélange MNOfin-Gxfin, une valeur de 276 m²/kg pour le mélange MNOfin-Gxmoy et une valeur de 225 m²/kg pour le mélange MNOfin-Gxgros.

En comparant les 3 approches pour évaluer la surface spécifique (pour un même coefficient de forme $\alpha = 6$), on remarque que le modèle MK engendre généralement les valeurs de S_s les plus faibles et KCM mène à des valeurs plus élevées. Par exemple, $S_s = 287$ m²/kg pour l'échantillon MNO, 312 m²/kg selon l'approche de Chapuis et Légaré (1992) et 420 m²/kg avec le modèle KCM (tableau 4.2). C'est aussi le cas pour les échantillons ayant les granulométries les plus fines; par exemple, pour MNOfin, MNOfin égalisé et MNOfin Gxfin; le modèle KCM donne des valeurs de S_s plus élevées que les deux autres approches (i.e. : 762 m²/kg pour l'échantillon MNOfin égalisé contre 518 m²/kg selon l'approche de Chapuis et Légaré (1992) et 528 m²/kg avec le modèle MK; voir tableau 4.2).

La figure 4.6 compare les valeurs de S_s obtenues selon l'approche de Chapuis et Légaré à celles obtenues selon les modèles MK et KCM (pour un coefficient de forme $\alpha = 6$). On voit d'après ce graphique et les équations des courbes de tendances linéaires que la méthode de Chapuis et Légaré donne souvent des résultats plus proches de la méthode MK que de la méthode KCM ($S_{s(\text{Chapuis et Légaré})} \sim S_{s(\text{MK})} \sim 3/4 S_{s(\text{KCM})}$). Rappelons toutefois ici que les auteurs de ces deux modèles ont plutôt utilisé un coefficient de forme $\alpha = 10$ dans les applications prédictives.

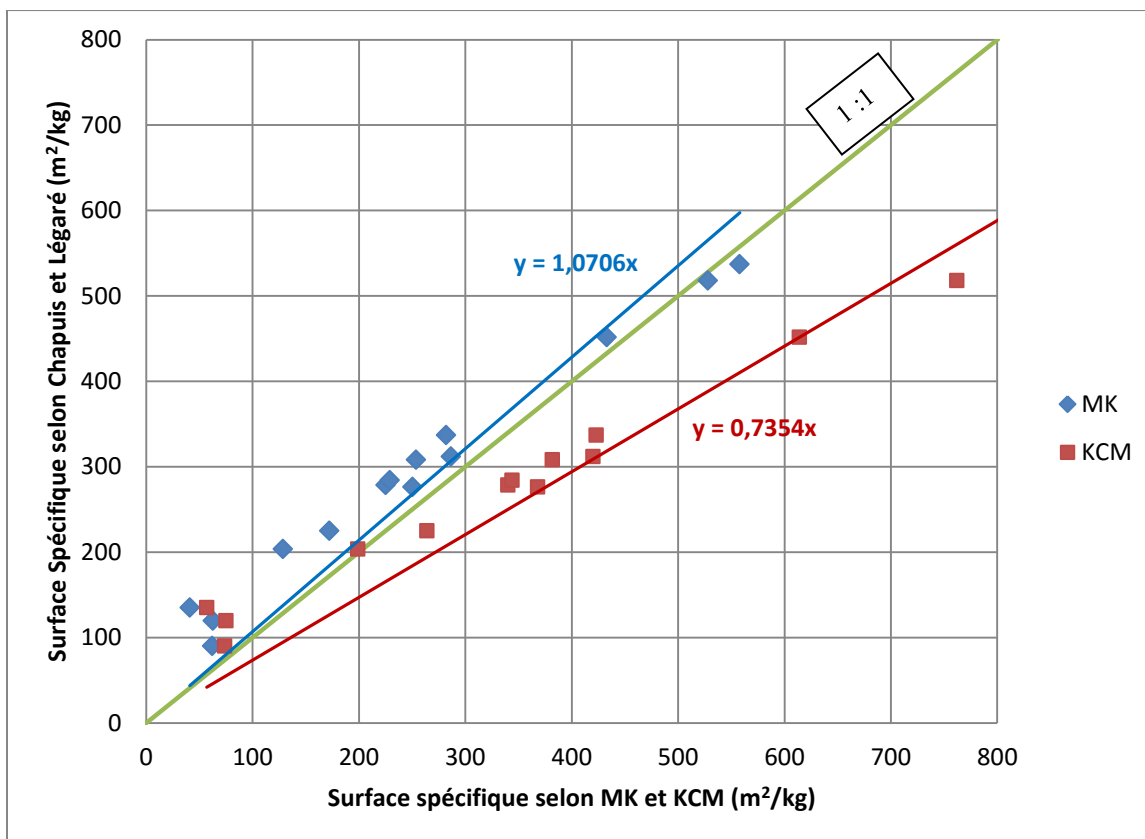


Figure 4.6 : Valeurs des Surfaces spécifiques S_s évaluées selon l'approche de Chapuis et Légaré (1992) et par les méthodes MK et KCM, pour un coefficient de forme $\alpha = 6$ (voir tableau 4.2).

4.1.2 Densité relative des grains solides

Les résultats des mesures de la densité relative des grains D_r sont présentés dans le tableau 4.3 et à la figure 4.7. On y montre les résultats de la caractérisation pour chaque échantillon au départ, et les résultats post-essais de consommation d'oxygène.

Les valeurs de D_r sont cohérentes avec la minéralogie. Les résidus MO et Gx montrent des concentrations plus faibles en métaux (surtout le fer), ce qui engendre une densité proche des sols naturels (entre 2,6 et 2,8). Le résidu MNO comporte une assez forte proportion de pyrite, ce qui augmente sa densité ($D_r \sim 3,1$). Cette valeur est typique des résidus sulfureux (D_r compris entre 2,9 et 4,5 selon Bussière, 2007).

Pour la série 1 (mélanges MNO28 à MNO73), le tableau 4.3 montre une évolution logique des valeurs de D_r avec le pourcentage de résidus sulfureux MNO. Les densités sont ainsi comprises entre les valeurs obtenues pour les résidus MNO ($D_r \sim 3,1$) et Gx ($D_r \sim 2,75$).

Pour la série 2 (MNOfin, MNOmoy, MNOgros), on observe une décroissance de la densité des grains solides lorsque la taille des grains augmente (D_r va de 3,134 à 2,961). La fraction plus grossière serait donc moins dense. Comme la valeur de D_r est liée à la teneur en pyrite, le résidu MNOgros pourrait contenir moins de pyrite. À noter qu'une analyse unique réalisée à l'UQAT sur MNOfin a donné une valeur beaucoup plus faible que celle obtenue lors des essais à Polytechnique (2,628 à l'UQAT vs 3,134), ce qui a soulevé des questions sur la validité de cette valeur. Trois autres mesures ont été réalisées plus tard en décembre 2015 afin de comparer les valeurs obtenues par les deux laboratoires; elles ont montrés des résultats similaires (tableau 4.4). La valeur de densité D_r de 2.628 pour le mélange MNOfin est donc probablement liée à une non-représentativité de l'échantillon testé; elle n'a donc pas été prise en compte dans la suite.

Tableau 4.3 : Valeurs de la densité relative des grains solides (D_r) des divers résidus et mélanges

Échantillons		D_r	
		Avant essai (Poly) moyenne [min-max]	post essai (UQAT) (mesure unique)
Résidus	MNO Juin	3,111 [3,083-3,144]	2,984
	MO	2,784 [2,764-2,806]	
	Gx	2,757 [2,744-2,770]	
Série 1	MNO28	2,875 [2,854-2,903]	2,805
	MNO50	2,907 [2,900-2,913]	2,860
	MNO73	3,003 [2,990-3,029]	2,899
Série 2	MNOfin	3,134 [3,127-3,142]	3,132
	MNOmoy	3,092 [3,064-3,122]	2,877
	MNOgros	2,961 [2,949-2,968]	
Série 3	MNOfin égalisé	2,983 [2,962-3,007]	2,946
	MNOmoy égalisé	2,996 [2,968-3,025]	
Série 4	MNOfin Gxfin	2,922 [2,896-2,950]	
	MNOfin Gxmoy	2,932 [2,912-2,951]	
	MNOfin Gxgros	2,900 [2,894-2,913]	

Tableau 4.4 : Valeurs de la densité relative des grains solides (D_r) des résidus MO, MNO et du mélange MNOfin mesurées en décembre 2015.

Échantillons	D_r	
	Poly	UQAT
MNO	3,074	3,031
MO	2,756	2,719
MNOfin	3,088	3,095

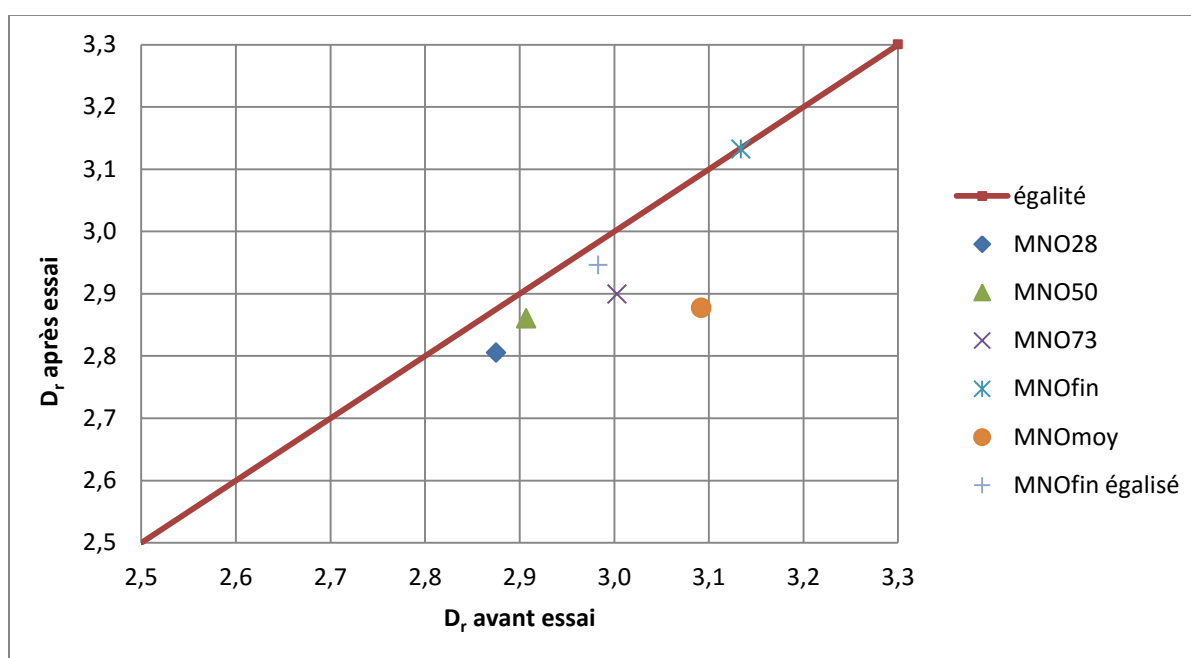


Figure 4.7 : Comparaison des valeurs de la densité relative des grains solides (D_r) avant et après les essais de consommation d'oxygène sur les divers résidus et mélanges (voir détails au tableau 4.3).

Les résultats obtenus sur les échantillons de la série 3 (MNOfin égalisé, MNOmoy égalisé, MNOgros) montrent des valeurs de D_r comparables (entre 2,961 et 2,983). La minéralogie (décrite plus loin dans ce chapitre) montre aussi des teneurs en pyrite semblables.

Les mélanges de la série 4 entre MNOfin et les différentes parties granulométriques de Gx montrent également des valeurs de D_r assez comparables (de 2,900 à 2,932), tout comme la minéralogie (décrite plus loin).

On voit à la figure 4.7 que les mesures de D_r avant et après les essais de consommation semblent montrer une certaine tendance à la baisse (relativement faible) des valeurs de D_r , excepté pour le résidu MNOfin. Cette baisse pourrait être la conséquence de la consommation d'oxygène (oxydation) qui entraînerait une diminution de la teneur en pyrite. Cet aspect sera discuté plus loin (au chapitre 5)

4.1.3 Essai de compactage

Le tableau 4.5 présente les résultats des essais de compactage selon la méthode Proctor modifiée (ASTM D1557-12, 2012) sur les résidus MNO et Gx. Les teneurs en eau w_{opt} et indice des vides e_{opt} sont distincts mais la masse volumique (densité) sèche maximale ρ_s et le degré de saturation S_r optimal sont comparables (voir détails à l'annexe A). Les valeurs de w_{opt} et ρ_d sont typiques des valeurs retrouvées dans la littérature (w_{opt} compris entre 10 et 20% ; ρ_d compris entre 1488 et 2049 kg.m⁻³ ; Bussière, 2007).

Tableau 4.5 : Résumé des résultats de l'essai de compactage sur deux résidus miniers.

Échantillons	e_{opt} (-)	w_{opt} (%)	S_r (%)	ρ_d (kg.m ⁻³)
MNO	0,65	15,2	72,7	1882
Gx	0,49	13,4	76,1	1856

4.2 Caractérisation hydrogéologique

Cette section présente les résultats des essais de perméabilité réalisés en cellules triaxiales et les mesures de rétention d'eau en cellules TEMPE. Ces essais ont été menés uniquement sur les résidus MNO et Gx, utilisés pour les mélanges. On compare aussi les résultats expérimentaux avec ceux obtenus des modèles prédictifs pour la conductivité hydraulique saturée (i.e. : modèle KCM, de Mbonimpa et al., 2002 et modèle KC, de Chapuis et Aubertin, 2003 ; voir section 2.2.1) et la CRE (modèle MK, de Aubertin et al., 2003 ; voir section 2.2.3).

4.2.1 Conductivité hydraulique saturée

Les résultats des essais de perméabilité à charge variable en cellules triaxiales sont résumés dans le tableau 4.6 (voir aussi annexe B) ainsi que sur les figures 4.8 et 4.9. Ces résultats sont comparés avec ceux prédits par les modèles KC et KCM. Deux essais par échantillon ont été effectués sur la même éprouvette. A noter que le degré de saturation S_r atteint lors de la

préparation des éprouvettes pour l'échantillon Gx est un peu faible (S_r de 91.4%, tableau 4.6), mais aucune correction n'a été apportée ici.

Les valeurs de conductivité hydraulique saturée obtenues expérimentalement pour chacun des résidus sont comparables ($3,56 \times 10^{-5}$ et $3,30 \times 10^{-5} \text{ cm.s}^{-1}$ pour MNO ; $1,17 \times 10^{-4}$ et $1,11 \times 10^{-4} \text{ cm.s}^{-1}$ pour Gx). Ces résultats sont typiques des valeurs de k_{sat} de résidus miniers rapportées dans la littérature (valeurs de k_{sat} comprises entre 7×10^{-7} et $4 \times 10^{-4} \text{ cm.s}^{-1}$ pour des valeurs de e comprises entre 0,61 et 1,70, selon Bussière, 2007).

Les figures 4.8 et 4.9 comparent les valeurs de k_{sat} obtenues lors des essais triaxiaux et celles prédites par les modèles KC (Aubertin et al., 2003) et KCM (Mbonimpa et al., 2002) (aussi présentées au tableau 4.6). Ces modèles prédictifs fournissent une estimation réaliste de la conductivité hydraulique saturée, compte tenu de la précision de ces essais. Le résidu Gx aurait une conductivité hydraulique plus proche du modèle KC, tandis que le résidu MNO se rapproche plus de KCM.

Tableau 4.6 : Résultats des essais triaxiaux sur les résidus MNO et Gx

Échantillon	e	S_r (%)	k_{sat} expérimentaux (cm.s^{-1})		k_{sat} prédit (cm.s^{-1})	
			Moyenne de 10 mesures [min-max] Essai 1	Moyenne de 10 mesures [min-max] Essai 2	KCM	KC
MNO	0,88	100	$3,56 \times 10^{-5}$ [$2,40 \times 10^{-5}$ – $3,89 \times 10^{-5}$]	$3,30 \times 10^{-5}$ [$2,45 \times 10^{-5}$ – $3,47 \times 10^{-5}$]	$5,92 \times 10^{-5}$	$1,23 \times 10^{-4}$
Gx	0,82	91,4	$1,17 \times 10^{-4}$ [$1,08 \times 10^{-4}$ – $1,18 \times 10^{-4}$]	$1,11 \times 10^{-4}$ [$1,08 \times 10^{-4}$ – $1,18 \times 10^{-4}$]	$5,32 \times 10^{-5}$	$1,07 \times 10^{-4}$

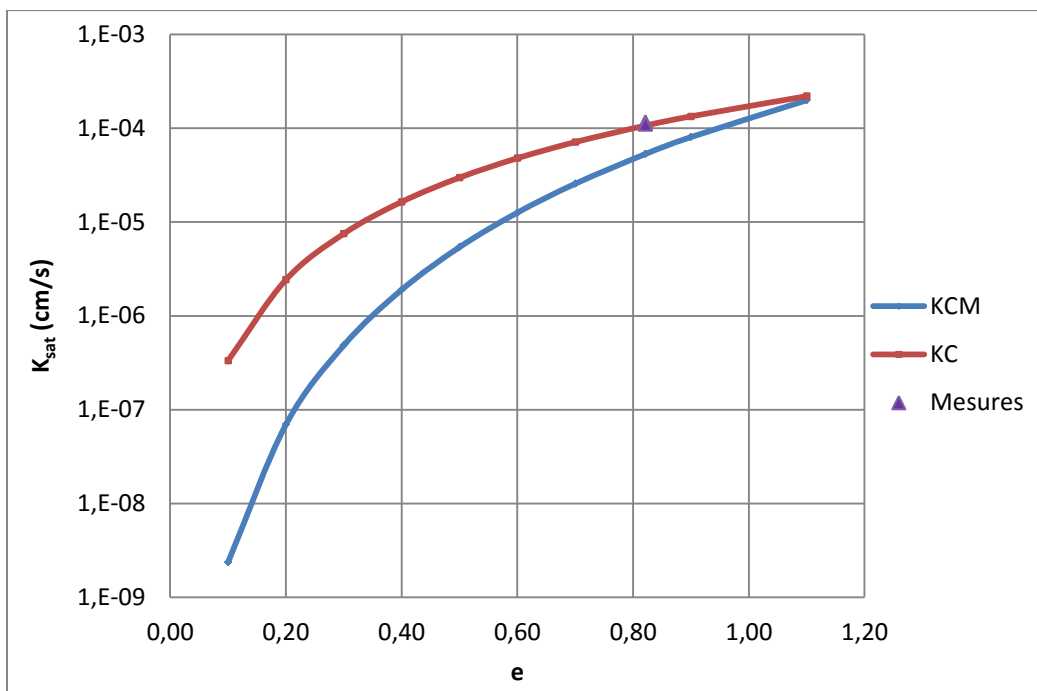


Figure 4.8 : Valeurs de k_{sat} mesurée (moyenne) et obtenues des modèles prédictifs KC et KCM pour le résidu Gx, en fonction de l'indice des vides e .

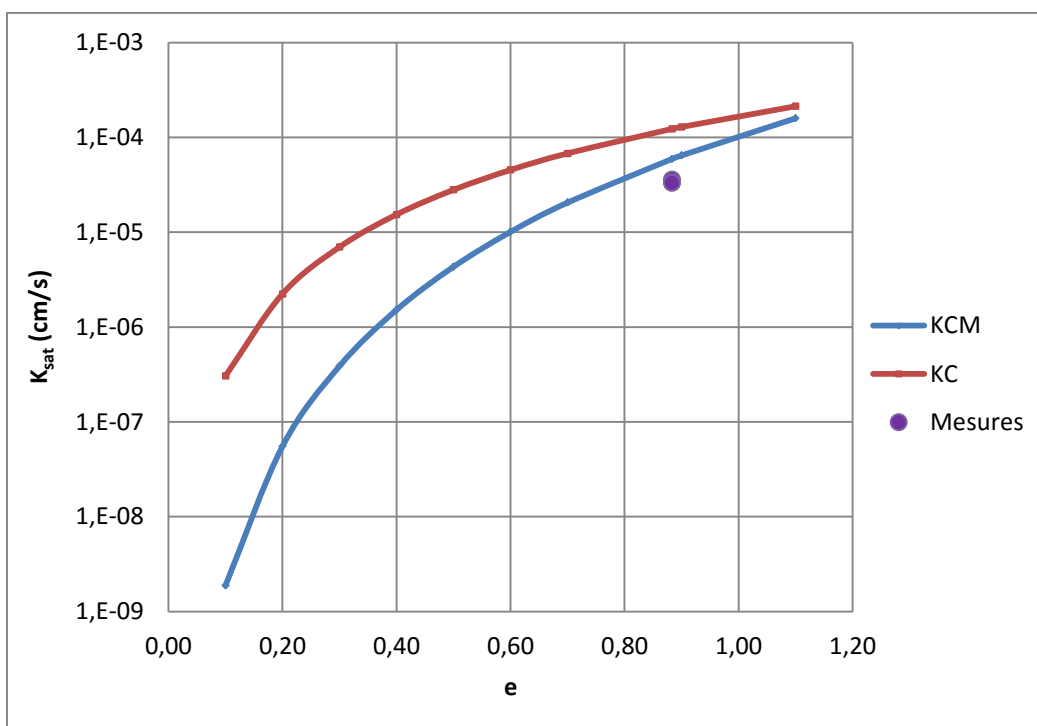


Figure 4.9 : Valeurs de k_{sat} mesurée (moyenne) et obtenues des modèles prédictifs KC et KCM pour le résidu MNO, en fonction de l'indice des vides e .

4.2.2 Courbes de rétention d'eau

Les courbes de rétention d'eau, CRE, ont été obtenues expérimentalement par des essais en cellules TEMPE (décrits à la section 3.3.2 ; voir aussi Gosselin, 2007 ; Ouangrawa, 2007 ; Pabst, 2011) . Nous avons lissé les valeurs mesurées de la teneur en eau volumique θ_w (ou TEV) et du degré de saturation S_r , en fonction de la succion ψ , selon une fonction fournie par le logiciel RETC (van Genuchten et al., 1991), basée sur le modèle de van Genuchten (1980) (éq. 2.25 et 2.26 avec $m_{vG}=1-1/n_{vG}$). La teneur en eau volumique à saturation (θ_s , éq. 2.26) est égale à la porosité (n). Les paramètres de ce modèle de la CRE sont présentés dans le tableau 4.7. Le tableau 4.8 présente les valeurs des pressions d'entrée d'air, AEV (ou Ψ_a), calculées avec le modèle MK (Aubertin et al., 2003, éq. 2.35) et estimés avec la méthode des tangentes appliquée à la courbe lissée par RETC et celle estimée par le modèle MK.

Pour le résidu MNO, les différentes valeurs sont comparables. La courbe obtenue de RETC pour le résidu Gx tend à sous-estimer la valeur de l'AEV en raison d'un manque de données expérimentales à faible succion (i.e. incréments de pression de gaz trop grands; tableau 4.8). Les valeurs de Ψ_a sont comparables aux valeurs typiques des résidus miniers de mines en roches dures (Ψ_a compris entre 9,81 et 68,67 kPa ; selon Bussière, 2007)

Les figures 4.10 et 4.11 présentent les courbes expérimentales avec le lissage par le code RETC, et celles prédites par le modèle MK (Aubertin et al., 2003). Le modèle prédictif MK représente relativement bien les CRE des deux résidus miniers, surtout pour MNO. Le modèle van Genuchten lissé par RETC suit bien les points expérimentaux.

Tableau 4.7 : Paramètres calculés par le logiciel RETC pour établir les CRE lissées des résidus Gx et MNO, à partir des données expérimentales et le modèle van Genuchten (1980) (éq. 2.25 et 2.26)

	$\theta_s = n$	α_{vG}	n_{vG}	m_{vG}
Gx	0,40	3,536	1,237	0,191
MNO	0,49	0,077	1,585	0,369

Tableau 4.8 : Valeurs des AEV mesurées et estimées avec la méthode des tangentes et prédite par le modèle MK.

Résidus	Ψ_a mesuré Tangente CRE MK (kPa)	Ψ_a mesuré Tangente courbe RETC (kPa)	Ψ_a prédit (éq. 2.35) (kPa)
Gx	20	1	26
MNO	20	45	22

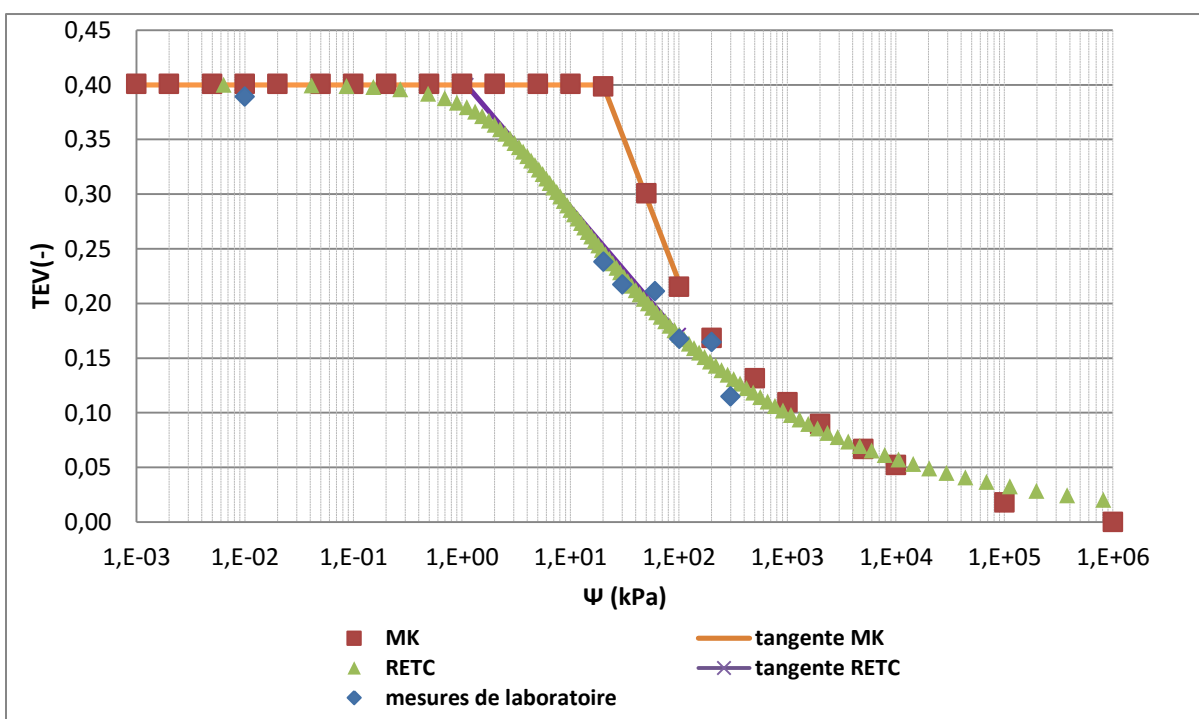


Figure 4.10 : Valeurs expérimentales de la TEV en fonction de la succion ψ , CRE lissée (RETC) et prédite (MK) pour le résidu Gx

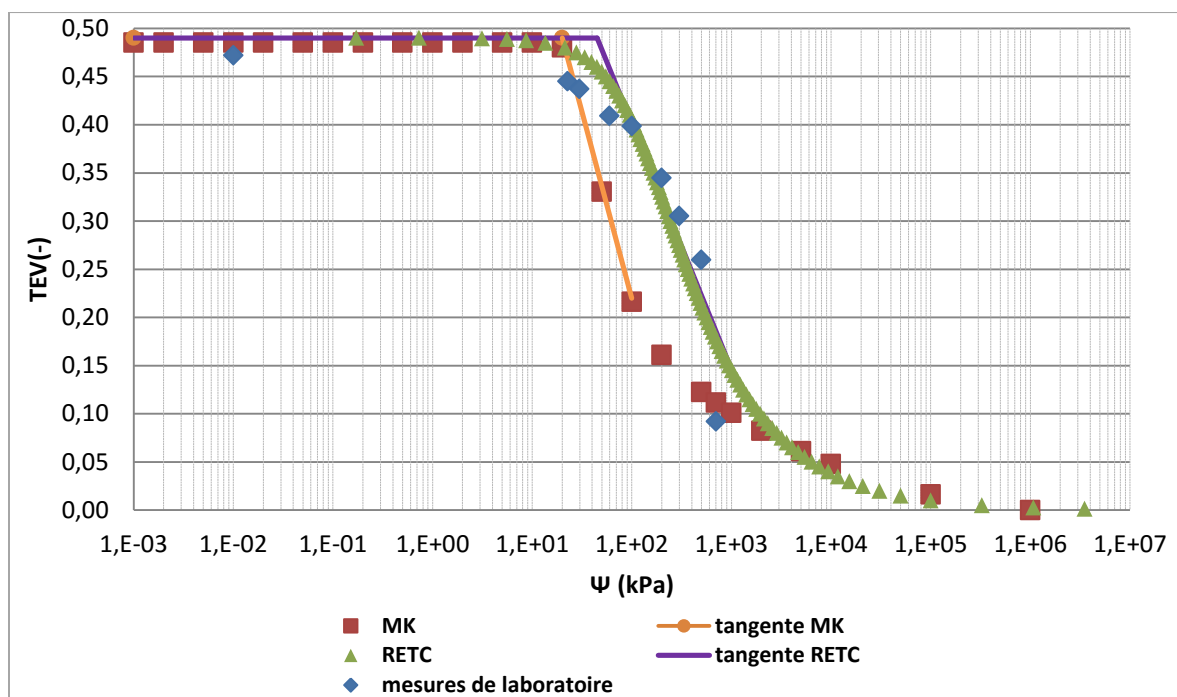


Figure 4.11 : Valeurs expérimentales de la TEV en fonction de la succion ψ , CRE lissée (RETC) et prédite (MK) pour le résidu MNO

4.3 Caractérisation géochimique et minéralogique

Les résultats expérimentaux de la caractérisation géochimique et minéralogique sont présentés dans cette section. Ces résultats ont permis d'évaluer certains mélanges en fonction des conditions visées. Un autre objectif était de comparer les teneurs en soufre et en pyrite avant et après des essais de consommation.

4.3.1 Teneur en soufre et en carbone

Le tableau 4.9 présente l'ensemble des résultats des analyses à la fournaise LECO, réalisées au laboratoire de géochimie de Polytechnique Montréal, sur des petits échantillons (résidus et mélanges) prélevés avant et après les essais de consommation d'oxygène. Rappelons que ces analyses sont réalisées sur quelques grammes de résidus, ce qui peut limiter la représentativité. La plupart des mesures ont donc été faites en triplicata. Les résultats présentés ici sont les valeurs moyennes mesurées avec les bornes inférieure et supérieure qui illustrent l'hétérogénéité (voir détails à l'annexe C).

Les teneurs en carbone (%C) sont relativement faibles pour tous les échantillons (i.e. 0.34% à 0.90 %) ; le résidu MO en contient le moins (0.06%).

Les échantillons des résidus MNO et MO présentent des teneurs en soufre très différentes en raison (possiblement) de leur état d'oxydation. L'échantillon MNO montre une valeur de teneur en soufre de près de 11%, tandis que l'échantillon pré-oxydé MO présente une valeur de 1.31%.

Les échantillons MNO28, MNO50 et MNO73 (série 1) montrent une augmentation progressive de la teneur en soufre (de 2.69 à 9.17%), ce qui concorde avec l'augmentation de la proportion de résidus MNO.

La série 2 met en évidence le fait que plus l'échantillon MNO est fin, plus la teneur en soufre est grande (teneur allant de 8.75% à 14.40%).

Les échantillons MNOfin égalisé et MNOmoy égalisé de la série 3 montrent des teneurs en soufre comparables à celle de l'échantillon MNOgros (7.09% pour MNOfin égalisé ; 8.65% pour MNOmoy égalisé et 8,75% pour MNOgros). C'était l'objectif visé.

La série 4 (MNOfin-Gxfin, MNOfin-Gxmoy et MNOfin-Gxgros) montre des teneurs en soufre comparables (5.41%, 6.01%, 4.92%), compte tenu de la fourchette d'incertitude.

La figure 4.12 présente graphiquement la teneur en soufre (%S) mesurée avant et après les essais de consommation de l'oxygène. Ces résultats ne montrent pas une évolution claire de la teneur en soufre. Néanmoins, quelques échantillons montrent une certaine diminution ; les valeurs passent de 14.40% à 13.07% pour MNOfin, de 12.20% à 9.60% pour MNOmoy et de 9.17% à 8.31% pour MNO73.

Les résultats montrent, en général, une légère tendance à la hausse pour les valeurs de teneurs en carbone (%C) après les essais de consommation d'oxygène, sauf pour MNO50, qui conserve la même valeur (0.50%) et MNOfin égalisé qui voit sa teneur en carbone diminuer un peu (de 0.72% à 0.68%).

Tableau 4.9 : Résultats des analyses LECO avant et après les essais de consommation d'oxygène

Échantillons		Soufre (% massique)		Carbone (% massique)	
		avant essai Moyenne [min-max]	après essai Moyenne [min-max]	avant essai Moyenne [min-max]	après essai Moyenne [min-max]
Résidus	MNO	10,98 [9,65 - 12,10]	11,67 [10,40 - 13,40]	0,44 [0,44 - 0,45]	0,50 [0,40 - 0,65]
	MO	1,31 [1,25 - 1,39]		0,06 [0,06 - 0,06]	
	Gx	0,20 [0,19 - 0,21]	0,21 [0,21 - 0,21]	0,90 [0,90 - 0,91]	1,07 [1,05 - 1,10]
Série 1	MNO28	2,69 [2,52 - 2,85]	3,40 [2,78 - 3,88]	0,70 [0,57 - 0,80]	1,03 [0,80 - 1,27]
	MNO50	5,97 [5,59 - 6,53]	5,54 [4,88 - 6,64]	0,70 [0,64 - 0,83]	0,70 [0,58 - 0,87]
	MNO73	9,17 [8,55 - 9,73]	8,31 [7,85 - 9,04]	0,61 [0,52 - 0,77]	0,71 [0,50 - 1,02]
Série 2	MNOfin	14,40 [14,10 - 14,70]	13,07 [12,2 - 13,90]	0,43 [0,37 - 0,50]	0,50 [0,47 - 0,54]
	MNOmoy	12,20 [12,10 - 12,30]	9,60 [8,31 - 10,30]	0,48 [0,47 - 0,51]	0,55 [0,41 - 0,73]
	MNOgros	8,75 [7,92 - 9,81]		0,34 [0,30 - 0,37]	
Série 3	MNOfin égalisé	7,09 [6,56 - 8,79]	7,80 [7,50 - 8,04]	0,72 [0,68 - 0,76]	0,68 [0,67 - 0,70]
	MNOmoy égalisé	8,65 [8,44 - 8,79]		0,66 [0,63 - 0,71]	
Série 4	MNOfin Gxfin	5,41 [5,40 - 5,42]		0,76 [0,76 - 0,78]	
	MNOfin Gxmoy	6,01 [5,92 - 6,06]		0,66 [0,65 - 0,67]	
	MNOfin Gxgros	4,92 [4,78 - 5,14]		0,51 [0,50 - 0,52]	

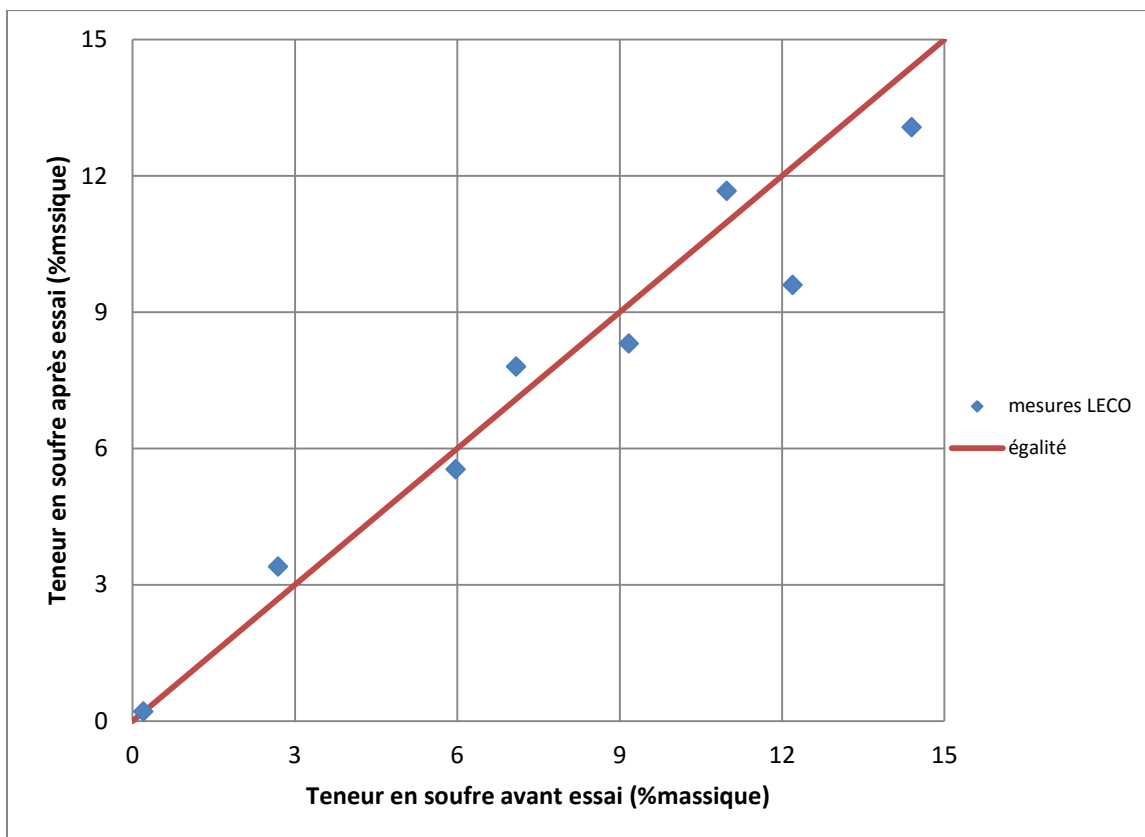


Figure 4.12 : Teneurs en soufre avant et après les essais de consommation de l'oxygène (mesures à la fournaise LECO; voir tableau 4.9)

4.3.2 Minéralogie

Les tableaux 4.10 à 4.14 présentent les résultats des analyses par diffraction des rayons X (DRX, réalisés à l'UQAT) sur les différents résidus et mélanges. Certains échantillons ont fait l'objet de répliques (i.e. quatre répliques pour MNO, deux répliques pour MNO28, MNO50, MNO73, MNOfin et MNOmoy). Les valeurs présentées sont des moyennes des résultats obtenus (voir détails à l'annexe D).

La minéralogie des résidus MNO et MO (tableau 4.10) comprend essentiellement du quartz, ainsi que de la muscovite, chlorite, pyrite, et labradorite. La teneur en pyrite est presque nulle pour le résidu MO. Le résidu MNO contient aussi de la sphalérite. L'échantillon de résidu Gx se compose majoritairement de quartz, calcite, muscovite et albite.

Tableau 4.10 : Minéralogie quantitative (% massique) selon les résultats des mesures au DRX pour les résidus MNO, MO et Gx

	MNO	MO	Gx
Quartz	35,9	64,5	22,8
Biotite Mica	0,1	0,4	<L.D.
Calcite	<L.D.	<L.D.	7,0
Muscovite	29,1	24,7	8,5
Chlorite	7,0	7,2	0,9
Labradorite	4,7	2,6	<L.D.
Albite	0,9	<L.D.	56,4
Pyrite	16,6	0,7	<L.D.
Gypse	1,7	<L.D.	<L.D.
Sidérite	0,3	<L.D.	<L.D.
Sphalérite	1,1	<L.D.	<L.D.
Brookite	1,3	<L.D.	<L.D.
Ankérite	1,0	<L.D.	1,0
Actinolite	<L.D.	<L.D.	1,0
Microcline intermédiaire	0,4	<L.D.	2,4
Total	100,0	100,0	100,0

Les échantillons de la série 1 (MNO28, MNO50, MNO73, tableau 4.11) présentent des caractéristiques minéralogiques cohérentes aux mélanges. Les quantités de quartz, muscovite et pyrite augmentent progressivement de MNO28 à MNO73. Les quantités de calcite et d'albite diminuent progressivement de MNO28 à MNO73. La quantité de chlorite est comparable dans chaque échantillon. On note la présence de minéraux qui n'étaient pas présent dans les résidus MNO et Goldex (i.e. magnétite, épidote, aégirine, ankérite ; tableau 4.10 à comparer au tableau 4.11). On observe également l'absence de brookite et de sidérite. La précision (plage de variation) de ces mesures, qui est discutée à la section 5.3.1, pourrait expliquer ces observations.

Les résidus MNOfin, MNOmoy, et MNOgros (série 2, tableau 4.12) ont une composition minéralogique comparable à celle du résidu MNO d'origine. On y retrouve du quartz, ainsi que de la muscovite, chlorite, pyrite, labradorite et sphalérite. On remarque aussi la présence de basanite dans la fraction grossière. La pyrite n'est pas répartie de manière égale dans chaque fraction ; elle est plus abondante dans la partie fine, et la proportion diminue progressivement

avec l'augmentation de la taille granulométrique (18.6% pour MNOfin, 14.3% pour MNOmoy et 10.3% pour MNOgros).

Tableau 4.11 : Minéralogie quantitative (% massique) selon les résultats des mesures au DRX pour les échantillons MNO28, MNO50, MNO73 (série 1)

	MNO28	MNO50	MNO73
Quartz	26,1	29,4	33,6
Calcite	5,0	4,0	2,6
Muscovite	8,2	10,5	14,1
Chlorite	6,2	5,8	5,6
Labradorite	4,0	4,8	6,7
Albite	36,2	27,0	14,1
Pyrite	5,5	9,2	14,0
Gypse	0,5	1,0	1,6
Magnetite	0,5	0,4	0,6
Anhydrite	0,2	0,0	0,0
Epidote	1,9	1,9	1,5
Aegirine	2,2	2,7	2,8
Ankérinite	1,3	1,2	1,2
Actinolite	0,5	0,4	0,6
Microcline intermédiaire	1,7	1,7	1,0
Total	100,0	100,0	100,0

Tableau 4.12 : Minéralogie quantitative (% massique) selon les résultats des mesures au DRX pour les échantillons MNOfin, MNOmoy, MNOgros (série 2)

	MNOfin	MNOmoyen	MNOgros
Quartz	32,8	43,6	41,7
Muscovite	26,6	18,6	21,6
Chlorite	10,1	10,9	11,8
Labradorite	7,5	7,2	3,9
Pyrite	18,6	14,3	10,3
Gypse	0,3	<L.D.	<L.D.
Sphalérite	1,8	1,9	1,2
Ankérinite	2,2	3,6	2,1
Basanite	<L.D.	<L.D.	7,5
Total	100,0	100,0	100,0

Tableau 4.13 : Minéralogie quantitative (% massique) selon les résultats des mesures au DRX pour les échantillons MNOfin égalisé, MNOmoy égalisé (série 3)

	MNOfin égalisé	MNOmoy égalisé
Quartz	32,1	43,6
Calcite	4,5	3,4
Muscovite	0,2	0,2
Chlorite	7,0	6,9
Albite	29,4	23,1
Pyrite	10,9	10,6
Magnetite	2,8	<L.D.
Sidérite	0,9	<L.D.
Sphalérite	1,1	1,2
Ankérite	1,6	2,4
Actinolite	3,0	2,9
Microcline intermédiaire	6,5	5,9
Total	100,0	100,0

Tableau 4.14 Minéralogie quantitative (% massique) selon les résultats des mesures au DRX pour les échantillons MNOfin-Gxfin, MNOfin-Gxmoy, MNOfin-Gxgros (série 4)

	MNOfin Gxfin	MNOfin Gxmoy	MNOfin Gxgros
Quartz	25,9	30,1	26,8
Calcite	6,1	4,4	3,0
Muscovite	10,3	10,0	9,4
Chlorite	13,3	11,2	10,6
Albite	35,4	34,3	41,4
Pyrite	6,7	7,4	6,2
Sphalérite	0,5	0,8	0,8
Ankérite	2,0	1,8	1,9
Total	100,0	100,0	100,0

Pour la série 3, les échantillons des résidus MNOfin et MNOmoy ont été mélangés avec des fractions (de même granulométrie) du résidu Gx (MNOfin avec Gxfin, MNOmoy avec Gxmoy) pour égaliser les teneurs en pyrite et s'approcher de celle de l'échantillon MNOgros. Les

fractions égalisées du résidu MNO (série 3, tableau 4.13) comportent donc des minéraux présents dans les résidus Gx et MNO (i.e. : quartz, muscovite, chlorite, pyrite, calcite, albite). Leur teneur en pyrite (C_p) est comparable (10.6% pour MNO_{moy} égalisé et 10.9% pour MNO_{fin} égalisé) et proche de celle visée, correspondant au résidu MNO_{gros} ($C_p = 10.3\%$).

Les mélanges de la série 4 entre la fraction fine du résidu MNO et les différentes fractions du résidu Gx (MNO_{fin}-Gx_{fin}, MNO_{fin}-Gx_{moy}, MNO_{fin}-Gx_{gros} ; tableau 4.14) se composent également de minéraux présents dans les résidus d'origine (quartz, chlorite, muscovite, pyrite, albite, sphalérite, calcite). Les teneurs en pyrite (C_p) sont relativement proches (6.7% pour MNO_{fin}-Gx_{fin}, 7.4% pour MNO_{fin}-Gx_{moy} et 6.2% pour MNO_{fin}-Gx_{gros}). Ces échantillons contiennent 50% de MNO_{fin}. Leur teneur en pyrite aurait dû être environ 50% de la teneur en pyrite de l'échantillon MNO_{fin} (soit $18,6\% / 2 = 9,3\%$). La précision relative (plage de variation) des mesures, discutée à la section 5.3.1, pourrait expliquer cette différence.

Le tableau 4.15 et la figure 4.13 présentent les valeurs de la teneur en pyrite C_p avant et après les essais de consommation d'oxygène (selon les mesures au DRX).

On observe que les valeurs de C_p après les essais de consommation d'oxygène sont plus basses, excepté pour les échantillons MNO_{fin} et MNO_{fin} égalisé.

La figure 4.14 présente les valeurs de teneurs en pyrite (C_p) en fonction des valeurs de teneur en soufre (%S), avant et après les essais de consommation d'oxygène. On montre aussi la droite représentant la teneur en pyrite (FeS_2) en fonction de la teneur en soufre total (S) , en supposant que le soufre n'est présent que sous forme de pyrite ; l'équation correspondante est la suivante :

$$C_p = 2 * \%S * \frac{M_{\text{FeS}_2}}{M_S} \quad (4.1)$$

Où M_{FeS_2} et M_S sont les masses molaires de la pyrite (120 g.mol^{-1}) et du soufre ($32,1 \text{ g.mol}^{-1}$) respectivement; 2 est le coefficient stoechiométrique du soufre dans la formule chimique de la pyrite

On remarque qu'il y a proportionnalité entre %S et C_p . L'échantillon MNO_{moy} post-essai s'éloigne toutefois de la tendance générale, avec une teneur en pyrite nettement plus faible (compte tenu de la valeur de %S). La dispersion des mesures au DRX (tableau 4.15) pour ce cas est toutefois forte (C_p compris entre 4.11% et 9.8%), ce qui pourrait expliquer cette observation.

Tableau 4.15 : Teneurs en pyrite des résidus et mélanges (séries 1 à 4) selon les analyses DRX, avant et après les essais de consommation d'oxygène.

Échantillons		Teneur en pyrite C_p (%)	
		avant essai Moyenne [min-max]	post essai Moyenne [min-max]
Résidus	MNO	16,7 [13,88 - 21,85]	16,37
	MO	0,67	
	Gx	< L.D.	< L.D.
Série 1	MNO28	5,50 [4,98 - 6,02]	4,09 [4,05 - 4,12]
	MNO50	9,21 [8,32 - 10,09]	6,37 [6,24 - 6,49]
	MNO73	14,04 [12,87 - 15,2]	10,96 [10,9 - 11,02]
Série 2	MNOfin	18,61 [17,67 - 19,54]	18,60
	MNOmoy	14,27	6,96 [4,11 - 9,8]
	MNOgros	10,25	
Série 3	MNOfin égalisé	10,88	10,40
	MNOmoy égalisé	10,58	
Série 4	MNOfin Gxfin	6,65	
	MNOfin Gxmoy	7,44	
	MNOfin Gxgros	6,20	

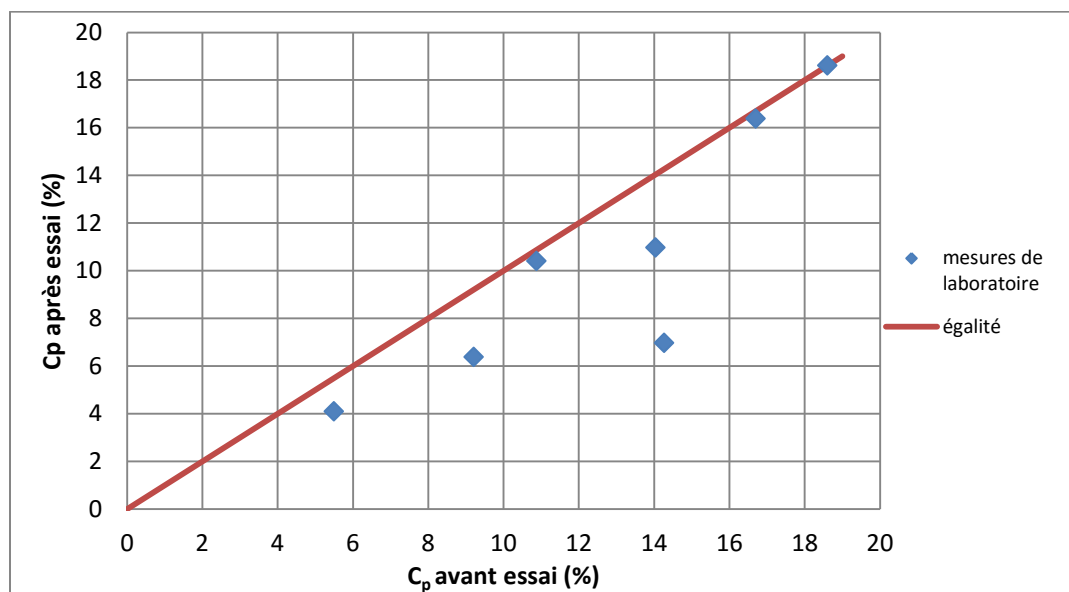


Figure 4.13 : Teneur en pyrite (C_p) des résidus et mélanges avant et après les essais de consommation d'oxygène (voir tableau 4.15)

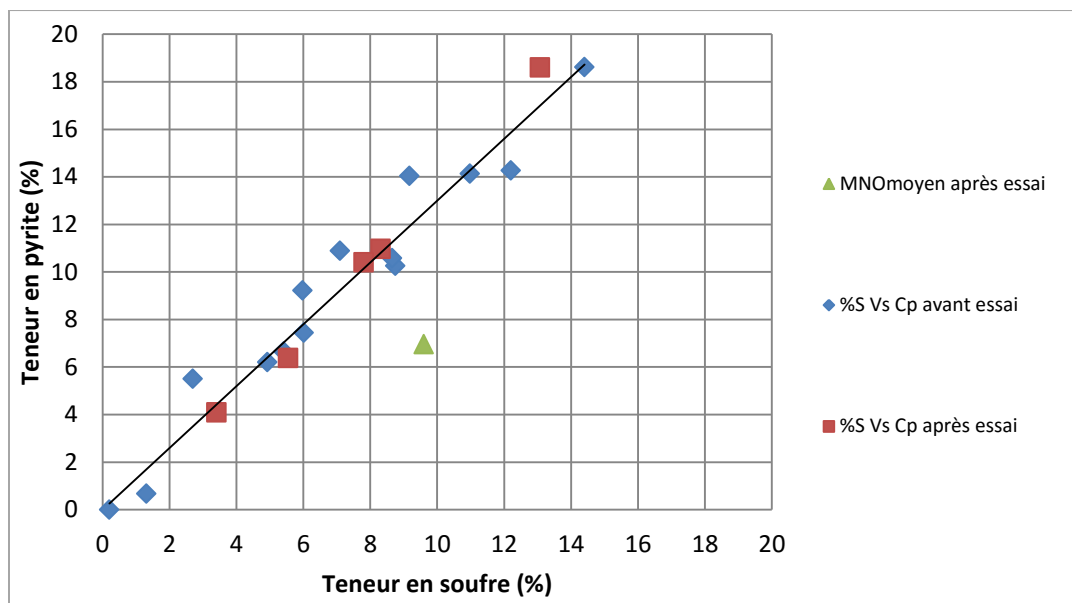


Figure 4.14 : Teneur en pyrite (C_p) et en soufre (%S) des divers résidus et mélanges avant et après les essais de consommation d'oxygène (voir tableaux 4.9 et 4.15) ; on montre aussi la droite représentant la teneur en pyrite en fonction de la teneur en soufre total, en supposant que le soufre n'est présent que sous forme de pyrite (voir équation 4.1).

4.3.3 Potentiel de génération d'acide

Le tableau 4.16 résume les résultats des analyses statiques menées selon la méthode de Lawrence et Wang (1997) décrites dans la section 2.1.3.

Les résultats des analyses statiques montrent que les valeurs du potentiel d'acidité PA sont comprises entre 6 kgCaCO₃/t (pour le résidu Gx) et 450 kgCaCO₃/t (pour le mélange MNOfin); les valeurs du potentiel de neutralisation PNC varient de 28 kgCaCO₃/t (pour le mélange MNOgros) à 75 kgCaCO₃/t (pour le résidu Gx), excepté pour le résidu MO dont le PNC est de 5 kgCaCO₃/t.

Les résidus MNO et MO présentent une différence notable de la valeur de PA (343 kgCaCO₃/t contre 41 kgCaCO₃/t respectivement) ; ceci reflète la différence de teneur en pyrite. Néanmoins, ils sont tous deux classés comme acidogènes selon la méthode décrite à la section 2.1.3 (i.e. PNC/PA < 1 et PNC-PA < -20 kgCaCO₃/t). Le résidu Gx est classé acidivore selon cette même méthode (i.e. PNC/PA > 2.5 et PNC-PA > 20 kgCaCO₃/t).

Les échantillons MNO28, MNO50, MNO73 (série 1) montrent une augmentation du potentiel de génération d'acide de l'échantillon MNO28 ($PA = 84 \text{ kgCaCO}_3/\text{t}$) à MNO73 ($PA = 287 \text{ kgCaCO}_3/\text{t}$), conformément à la proportion de résidus MNO. Ils sont tous acidogènes.

Tableau 4.16 : Résultats des analyses statiques selon la méthode de Lawrence et Wang (1997) avec les valeurs de PA, PNC, PNCN et PNC/PA (voir définitions à la section 2.1.3)

Échantillons		PA	PNC	PNCN	PNC/PA
Résidus	MNO	343	37	-307	0,1
	MO	41	5	-36	0,1
	Gx	6	75	69	12,0
Série 1	MNO28	84	58	-26	0,7
	MNO50	187	58	-128	0,3
	MNO73	287	51	-236	0,2
Série 2	MNOfin	450	36	-414	0,1
	MNOmoy	381	40	-341	0,1
	MNOgros	274	28	-245	0,1
Série 3	MNOfin égalisé	222	60	-162	0,3
	MNOmoy égalisé	270	55	-215	0,2
Série 4	MNOfin Gxfin	169	63	-106	0,4
	MNOfin Gxmoy	188	55	-133	0,3
	MNOfin Gxgros	154	43	-111	0,3

Les échantillons MNOfin, MNOmoy, et MNOgros (série 2) montrent une diminution du PA avec l'augmentation de la taille granulométrique ($450 \text{ kgCaCO}_3/\text{t}$ pour MNOfin à $274 \text{ kgCaCO}_3/\text{t}$ pour MNOgros) ; cela concorde avec les valeurs de C_p décrites précédemment. Ils sont tous acidogènes.

Les échantillons des mélanges de la série 3 montrent des valeurs de PA ($222 \text{ kgCaCO}_3/\text{t}$ pour MNOfin égalisé et $270 \text{ kgCaCO}_3/\text{t}$ pour MNOmoy égalisé) proches de l'échantillon MNOgros ($PA = 274 \text{ kgCaCO}_3/\text{t}$) ; cela s'explique par les valeurs de C_p semblables. Ils sont acidogènes également.

Les échantillons des mélanges de la série 4 (MNOfin-Gxfin, MNOfin-Gxmoy, MNOfin-Gxgros) présentent des valeurs de PA assez similaires ($169 \text{ kgCaCO}_3/\text{t}$, $188 \text{ kgCaCO}_3/\text{t}$ et $154 \text{ kgCaCO}_3/\text{t}$ respectivement), conformes aux teneurs en pyrite C_p (précédemment présentées). Ils sont aussi acidogènes.

La figure 4.15 reproduit la relation décrite à la section 2.1.3 pour la caractérisation du potentiel de génération d'acide. Un résultat en dessous de la droite $PA/PNC < 1$ est considéré acidogène.

Ceux au-dessus de la droite $PA/PNC > 2.5$ sont acidivores. La zone entre les deux droites est une zone d'incertitude, nécessitant des caractérisations (cinétiques) supplémentaires pour la prédiction (Villeneuve, 2004). La figure montre que l'ensemble des échantillons sont acidogènes, excepté le résidu Gx.

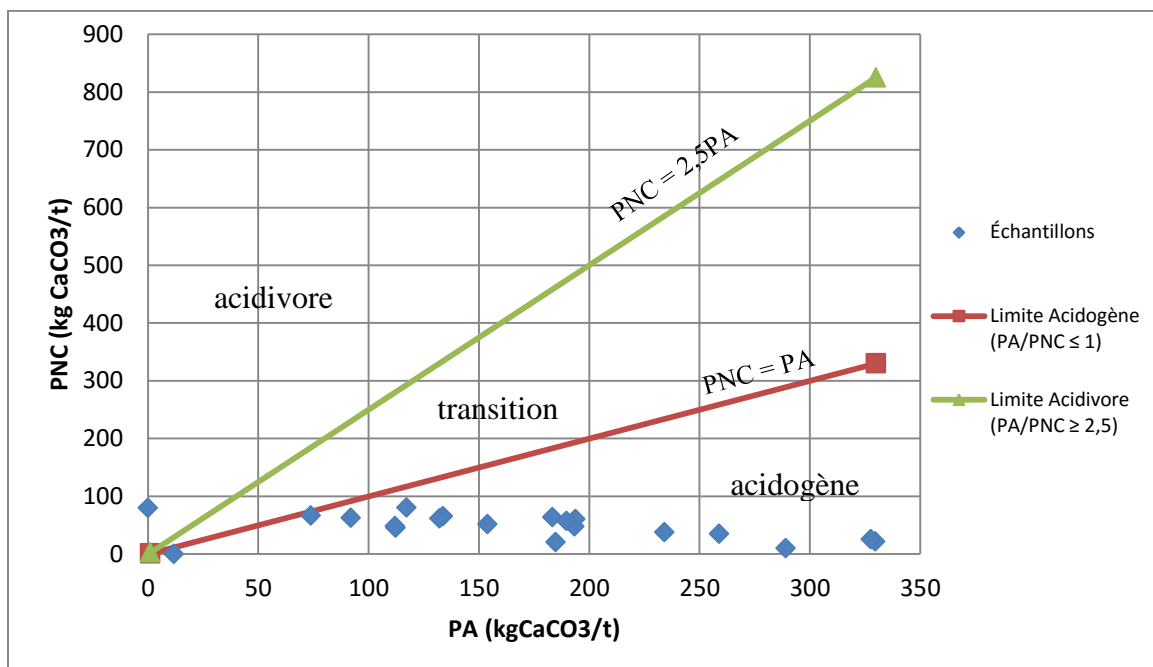


Figure 4.15 : Valeurs de PNC et PA des échantillons et relations graphiques pour la détermination du potentiel de génération de DMA, selon la valeur de PA/PNC (basé sur les bornes présentées par Villeneuve (2004)).

4.4 Essais de diffusion de l'oxygène

Les essais de diffusion de l'oxygène ont été menés selon le protocole décrit à la section 3.3.4 . L'interprétation numérique (avec le logiciel POLLUTE) a été réalisée selon la méthode décrite à la section 3.3.6 (voir aussi Mbonimpa et al., 2003; Gosselin, 2007). La figure 4.16 présente le résultat type d'un essai de diffusion d'oxygène sur un échantillon de résidu MNO pour un degré de saturation $S_r = 92 \%$. On observe la décroissance de la concentration de l'oxygène mesurée expérimentalement (et simulée numériquement) dans le réservoir supérieur, et l'augmentation de la concentration en oxygène dans le réservoir inférieur. Lorsque les courbes se rejoignent, l'équilibre est atteint dans la cellule; la concentration peut néanmoins continuer à baisser sous l'effet de la consommation de l'oxygène (lorsque les résidus sont réactifs). La vitesse de diffusion

est relativement lente pour cet essai et se termine en ~ 17 heures. On voit que les courbes expérimentales et numériques ajustées (avec POLLUTE) se superposent bien dans ce cas. Les petites différences peuvent être dues à divers facteurs, comme l'imprécision des mesures de dimensions et la concentration initiale de O₂ dans l'éprouvette (résidu sur sable). L'ensemble des résultats est présenté en détails à l'annexe E.

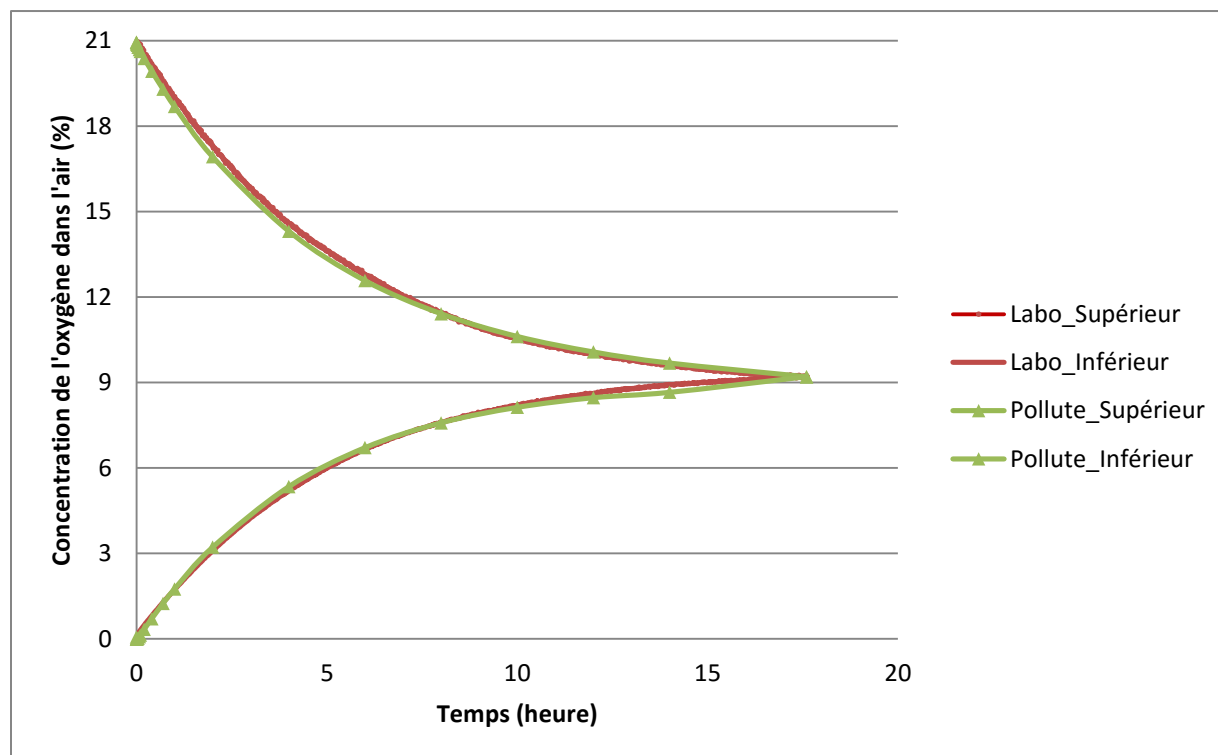


Figure 4.16 : Résultat de l'essai de diffusion de l'oxygène mené sur l'échantillon MNO avec un degré de saturation (S_r) de 0.92; le graphique montre la décroissance de la concentration en oxygène dans le réservoir supérieur (source) et l'augmentation dans le réservoir inférieur (récepteur).

Le tableau 4.17 résume l'ensemble des caractéristiques et des résultats de ces essais de diffusion. Les valeurs du coefficient de diffusion D_e sont exprimées en $m^2.an^{-1}$ ($1 m^2.an^{-1} = 2,74 \times 10^{-3} m^2.jr^{-1}$). Les résultats marqués d'un astérisque indiquent les cas où il y a un écart très important (facteur > 10) entre les valeurs du coefficient de diffusion D_e prédites selon le modèle de Aachib et al. (2004; voir éq. 2.45) et les celles déduites des mesures (interprétées avec POLLUTE). Notons ici que pour certains essais (p. ex. échantillons MNO50, MNO 2 et MO 2), il y a une grande imprécision sur le degré de saturation; cet aspect sera revu plus en détails à la

section 5.1. Pour au moins un échantillon (MNO28), l'écart entre la valeur de D_e prédite et mesurée serait dû à une mauvaise mise en place du résidu lors de la préparation; dans ce cas, la vitesse de diffusion est lente malgré la faible teneur en eau (degré de saturation de 23%), ce qui pourrait signifier une non-uniformité de l'éprouvette (avec zone d'accumulation d'eau). Néanmoins, pour la majorité des essais, les valeurs de D_e obtenues des résultats expérimentaux et du modèle prédictif concordent assez bien. La figure 4.17 montre que les résultats expérimentaux suivent assez bien le modèle prédictif d'Aachib et al. (2004), sauf pour que les 4 résultats identifiés précédemment.

Tableau 4.17 : Résumé des caractéristiques et résultats des essais de diffusion d'oxygène sur les résidus et mélanges; les valeurs marquées d'un * représentent les cas où il y a un écart important (facteur > 10) entre les valeurs du coefficient de diffusion D_e prédites et ajustées.

Échantillons		Épaisseur sous le sable (mm)	densité sèche ρ_d (g/cm ³)	Porosité n (%)	Porosité éq. θ_{eq} (éq. 2.39)	Degré de sat. S_r (%)	D_e prédit (m ² /an)	D_e ajusté (m ² /an)	K_r prédit (/an)	K_r ajusté (/an)
Résidus	MNO	8.6	1.795	42	0.221	49	20.5	32.0	1351.4	1303.6
	MNO Juin	16.7	1.621	48	0.051	92	0.08*	0.8*	1220.5	100.8
	MO	21.5	1.715	38	0.14	65	5.7	11.2	22.6	17.0
	MO 2	12.7	1.643	41	0.043	92	0.06*	1.1*	21.6	10.5
	Gx	18.6	1.736	37	0.138	65	5.9	9.7	0.0	0.0
Série 1	MNO28	27.8	0.827	71*	0.58	23	147.0*	6.1*	161.4	303.9
	MNO50	8.3	1.794	38	0.043	100	0.001*	0.2*	661.2	247.4
	MNO73	9.7	1.608	46	0.319	30	62.4	58.2	815.2	871.5
Série 2	MNOfin	3.2	1.722	45	0.228	60	10.5	16.3	2185.7	1173.7
	MNOmoy	14.8	1.464	53	0.322	40	44.6	44.6	207.1	145.1
	MNOgros	23.8	1.433	52	0.332	41	41.7	48.4	93.8	90.8
Série 3	MNOfin égalisé	15.7	1.478	50	0.313	39	44.6	44.6	1339.6	273.9
	MNOmoy égalisé	17.3	1.464	51	0.308	42	38.4	40.1	158.5	143.5
Série 4	MNOfin Gxfin	15.5	1.465	50	0.275	51	22.0	27.4	857.8	274.7
	MNOfin Gxmoy	16.9	1.645	44	0.224	51	19.8	19.9	483.9	272.2
	MNOfin Gxgros	15.2	1.785	38	0.115	72	3.0	3.0	300.9	139.8

Les valeurs du coefficient du taux de réaction K_r prédites selon le modèle de Colin (1987; éq. 2.51) et mesurées (tableau 4.17) sont comparables pour plusieurs échantillons (i.e. MNO, MO, Gx, MNO75, MNOgros, MNOmoy et MNOmoy égalisé). Dans d'autres cas, on remarque des écarts entre les valeurs prédites et ajustées sont significatifs, allant d'un facteur 2 (pour MO 2, MNOfin) à 12 (pour MNO 2).

Les résultats indiquent aussi que les échantillons des séries 2 et 3 montrent une diminution de la valeur de K_r (mesurée) lorsque la granulométrie devient plus grossière (i.e. valeurs allant de 1174 an^{-1} pour MNOfin à 91 an^{-1} pour MNOgros), ce qui est conforme à la tendance anticipée (en lien avec la surface spécifique).

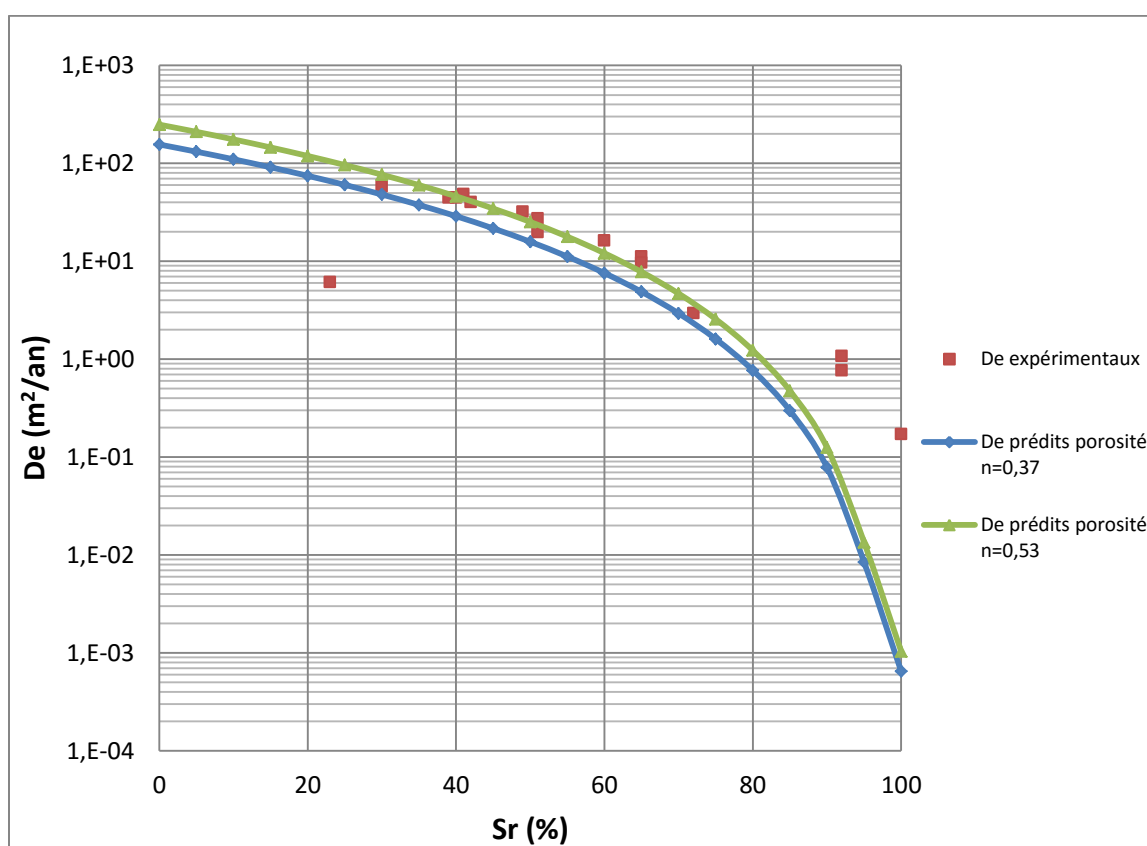


Figure 4.17 : Valeurs des coefficients de diffusion D_e obtenus expérimentalement suite aux essais de diffusion de l'oxygène et ceux prédits par le modèle de Aachib et al. (2004), pour des valeurs de porosité limites (porosités minimale et maximale pour l'ensemble des échantillons testés et ne présentant aucun écart important entre prédiction et mesure), en fonction du degré de saturation S_r

Les résultats de ces essais (et des autres) seront analysés et discutés au chapitre 5.

4.5 Essais de consommation de l'oxygène

La préparation des échantillons pour les essais de consommation de l'oxygène a été faite selon le protocole décrit à la section 3.3.5. Diverses séries de mélanges de résidus ont été préparés afin d'étudier l'influence de paramètres physiques et minéralogiques sur la réactivité des résidus miniers sulfureux. On peut rappeler sommairement les caractéristiques de ces séries comme suit :

-Série 1 (MNO28, MNO50, MNO73) : Mélanges réalisés entre les résidus MNO et Gx dans des proportions variables afin d'étudier l'effet du paramètre C_p (teneur en pyrite).

-Série 2 (MNOfin, MNOmoy, MNOgros) : Mélanges réalisés en fractionnant le résidu MNO à l'aide des tamis de taille 75 μm et 45 μm . On évalue ici l'effet de la taille des grains (surface spécifique, diamètre équivalent) et de la teneur en pyrite (C_p).

-Série 3 (MNOfin égalisé, MNOmoy égalisé, MNOgros) : Mélanges de diverses granulométries réalisés entre les résidus MNO et Gx. L'objectif était d'uniformiser les teneurs en pyrites C_p des échantillons afin d'isoler l'effet de la granulométrie.

-Série 4 (MNOfin-Gxfin, MNOfin-Gxmoy, MNOfin-Gxgros) : Mélanges réalisés entre MNOfin et les trois fractions granulométriques du résidu Gx, dans des proportions égales (50%-50%). L'objectif était d'obtenir des granulométries différentes, tout en conservant la même quantité (et granulométrie) de pyrite dans chaque échantillon. Le paramètre visé pour établir la comparaison est le diamètre équivalent D_H (équ. 2.50).

-Série 5 : il s'agit des échantillons de résidus MNO et MO testés à différents degré de saturation S_r .

Les résultats expérimentaux (concentration de O_2 mesurée) sont comparés aux résultats numériques des solutions obtenues avec POLLUTE et Vadose/W (présentés à la section 3.3.6). Les deux logiciels sont utilisés afin d'obtenir des résultats numériques de deux manières différentes, de façon à valider les valeurs de D_e et K_r obtenues.

Le résultat type d'un essai de consommation de l'oxygène mené sur un échantillon du résidu MNO28 (série 1) est montré à la figure 4.18. On observe que la diminution progressive de la concentration en oxygène suit ici une fonction de type exponentielle (selon les lois de Fick modifiées, équ. 2.43 et 2.44); voir Mbonimpa et al., 2003 et Gosselin, 2007 pour plus de détails). Les résultats numériques obtenus de POLLUTE et Vadose/W se superposent bien à la courbe

expérimentale. L'ensemble des résultats montre que le coefficient de réactivité K_r est lié au taux (vitesse) de décroissance de la concentration en oxygène. Les détails sur l'ensemble des essais sont présentés à l'annexe F.

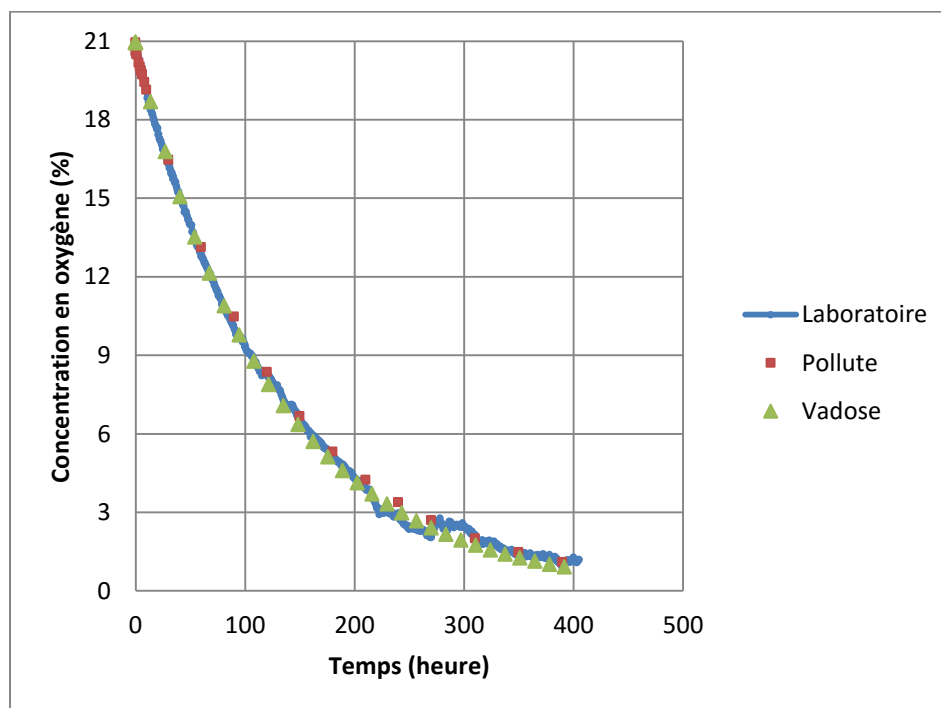


Figure 4.18 : Résultats de l'essai de consommation de l'oxygène sur le résidu MNO28 ($S_r = 36\%$; valeurs déduites de $D_e = 54 \text{ m}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ et $K_r = 175 \cdot \text{an}^{-1}$) et valeurs de la concentration d'oxygène obtenues des simulations réalisées avec POLLUTE et Vadose/W

Les résultats des essais sur les mélanges de la série 1 sont montrés aux figures 4.19 et 4.20 et au tableau 4.18. La figure 4.19 présente les courbes expérimentales de consommation d'oxygène pour ces échantillons, ainsi que les résultats des modélisations numériques associées obtenus avec Vadose/W et POLLUTE (n.b. ces modélisations ont été arrêtées au bout de 270 heures). On remarque que la baisse de la concentration de l'oxygène devient plus rapide lorsque l'on passe de l'échantillon MNO28 à MNO73, ce qui est cohérent avec l'augmentation de C_p .

Le tableau 4.18 résume les caractéristiques des échantillons, ainsi que les valeurs prédites et mesurées pour le coefficient du taux de réaction K_r et le coefficient de diffusion effectif D_e . On constate que les valeurs de K_r obtenues à l'aide des logiciels POLLUTE et Vadose/W sont similaires (avec des différences négligeables). Les résultats expérimentaux montrent aussi que la valeur de K_r augmente avec la teneur en pyrite (i.e. : $K_r = 170 \text{ an}^{-1}$ pour MNO28, 281 an^{-1} pour

MNO50, 307 an^{-1} pour MNO73, et de 318 à 387 an^{-1} pour MNO). Le second essai mené sur l'échantillon MNO (juin 2014) semble indiquer qu'il pourrait y avoir eu une certaine diminution de la réactivité entre les mois de mai et juin (387 an^{-1} à 319 an^{-1}). Ceci pourrait être dû à une baisse de C_p au cours de la période entre les deux essais de consommation de l'oxygène, ou à une altération des surfaces ; le degré de saturation plus faible (valeur passant de 44% à 28%) pourrait peut-être aussi expliquer en partie la réactivité plus faible (voir chapitre 5).

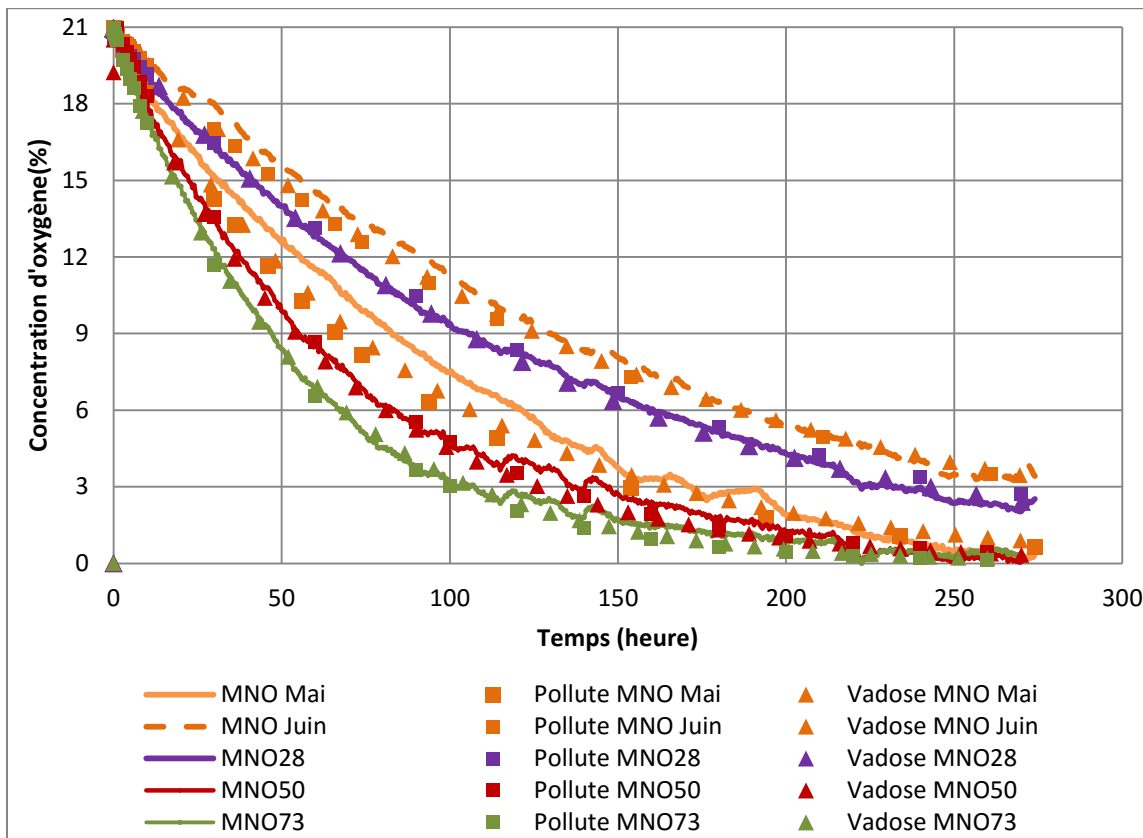


Figure 4.19 : Courbes expérimentales de la concentration d'oxygène dans le temps mesurés durant les essais de consommation d'oxygène menés sur les mélanges de résidus de la série 1 ; on montre aussi les valeurs obtenues par simulation numérique à l'aide des logiciels POLLUTE et Vadose/W (voir tableau 4.18).

Les résultats montrés au tableau 4.18, qui présente les caractéristiques de ces essais, indiquent que les coefficients de diffusion D_e prédits et ajustés sont comparables. Les valeurs ajustées aux données expérimentales avec les deux modèles numériques (POLLUTE et Vadose/W) sont les mêmes.

Le modèle de Collin (1987) anticipe une augmentation de K_r avec C_p (voir éq. 2.51), mais les valeurs prédites par ce modèle sont généralement surestimées comme on peut le voir à la figure 4.20, qui montre l'écart entre les prédictions et les valeurs expérimentales de K_r en fonction de C_p . Les courbes de tendances linéaires (inspirées de l'équation de Collin, éq. 2.51) sont aussi présentées (figure 4.20) pour les valeurs prédites et mesurées de K_r . On voit ainsi que la proportionnalité entre C_p et K_r (postulée par Collin) n'est pas entièrement respectée pour nos résultats expérimentaux. On remarque aussi que les échantillons MNO Mai et MNO Juin montrent une valeur de C_p identique, ce qui n'est pas le cas pour la valeur de K_r . Cela pourrait être dû (entre autres) à leur différence de porosité n lors de la préparation des éprouvettes. L'annexe K présente une analyse de ces résultats à partir des valeurs de K_r normalisées afin de tenir compte de l'influence des autres paramètres.

Tableau 4.18 : Conditions des essais de consommation d'oxygène et caractéristiques (K_r et D_e) prédites par le modèle de Collin (1987, éq. 2.51) et celui de Aachib et al. (2004; éq. 2.45) et celles obtenues par ajustement des résultats expérimentaux avec POLLUTE et Vadose/W, pour les échantillons de la série 1.

Échantillons		MNO28	MNO50	MNO73	MNO Mai	MNO Juin
Caractéristiques	Épaisseur de l'échantillon (mm)	26,31	31,50	24,48	25,32	15,75
	Masse volumique sèche ρ_d (kg/m ³)	1400	1339	1525	1737	1432
	Porosité n (%)	51	54	49	44	54
	Degré de saturation S_r (%)	36	32	45	44	28
	Porosité équivalente θ_{eq} (éq. 2.39)	0,34	0,37	0,28	0,26	0,39
K_r (/an)	Prédiction Collin (éq. 2.51)	275	493	778	1314	1079
	Ajustement POLLUTE	170	281	307	387	319
	Ajustement Vadose/W	183	292	292	387	318
D_e (m ² /an)	Prédiction Aachib et al., 2004 (éq. 2.45)	53	69	31	29	83
	Ajustement (POLLUTE et Vadose/W)	54	68	32	30	83

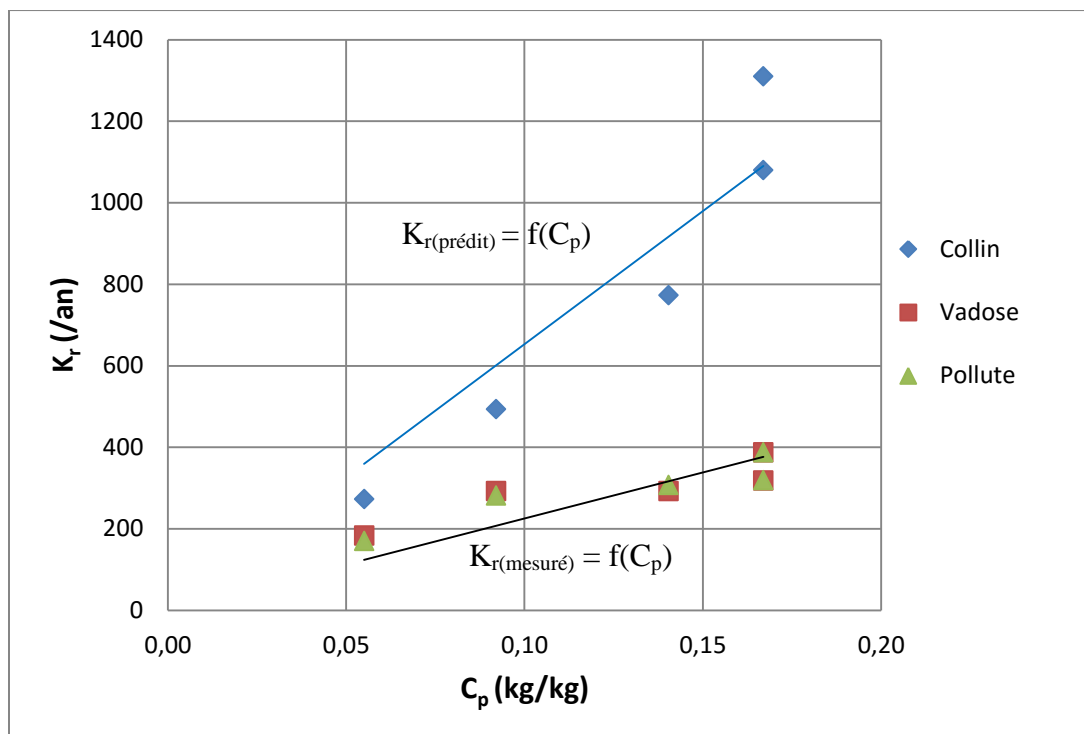


Figure 4.20 : Valeurs du coefficient du taux de réaction K_r (en fonction de la teneur en pyrite C_p) obtenues des données expérimentales interprétées avec POLLUTE et Vadose/W, et celles prédites avec le modèle de Collin (eq. 2.51; lignes en traits pleins), pour les échantillons de la série 1 (tableau 4.18).

Pour la série 2, les résultats des essais de consommation sont présentés aux figures 4.21, 4.22 et au tableau 4.19. Ces essais ont duré de 400 à 1200 heures. La figure 4.21 présente les courbes expérimentales de la concentration en oxygène mesurée en fonction du temps ainsi que les résultats des modélisations numériques associées selon Vadose/W et POLLUTE. On observe que la baisse de la concentration en oxygène est plus rapide pour l'échantillon MNOfin, et moins marquée pour l'échantillon MNOmoy. L'échantillon MNOgros qui a la plus faible teneur en pyrite et la granulométrie la plus grossière, semble consommer l'oxygène plus rapidement que l'échantillon MNOmoy.

Le tableau 4.19 indique que la valeur de réactivité calculée à l'aide des logiciels POLLUTE et Vadose/W pour l'échantillon MNOgros (132 an^{-1}) est plus élevée que pour l'échantillon MNOmoy (69 an^{-1}). Toutefois, les valeurs prédites par le modèle de Collin (eq. 2.51) suggèrent une consommation plus rapide pour l'échantillon MNOmoy que pour MNOgros ($K_r = 180 \text{ an}^{-1}$ contre 91 an^{-1}) (tableau 4.19).

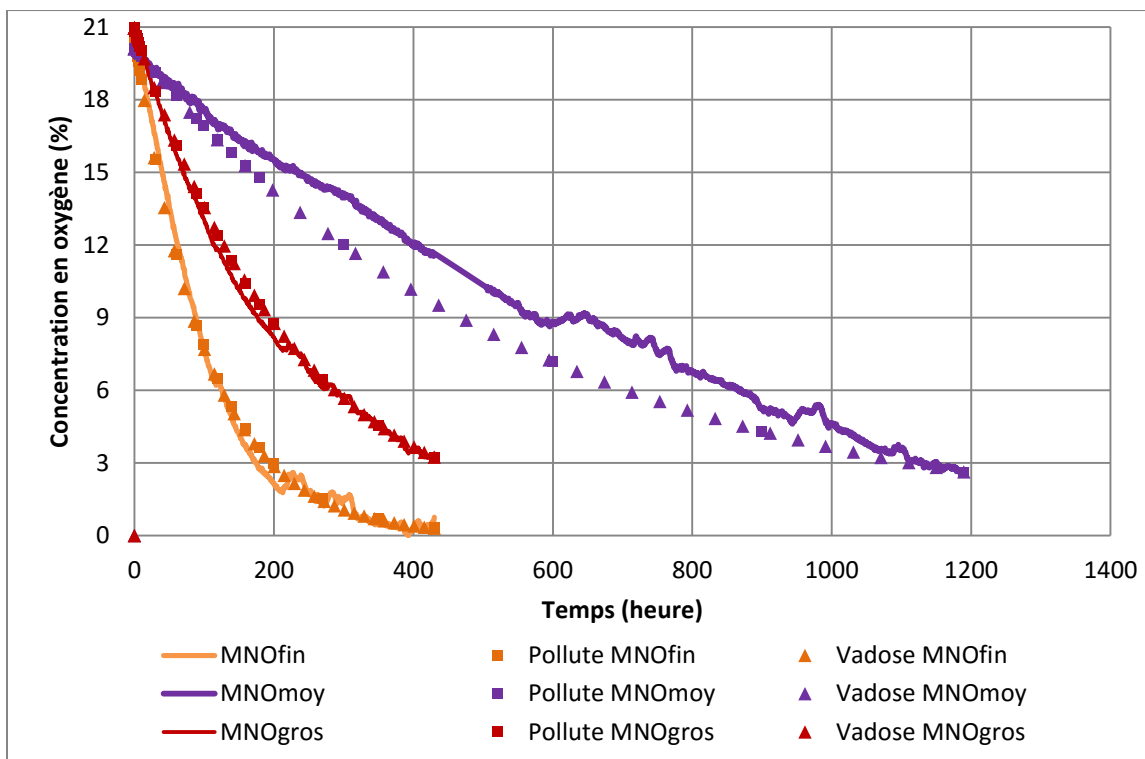


Figure 4.21 : Courbes expérimentales de la concentration d'oxygène dans le temps mesurés durant les essais de consommation d'oxygène menés sur les mélanges de résidus de la série 2 ; on montre aussi les valeurs obtenues par simulation numérique à l'aide des logiciels POLLUTE et Vadose/W (tableau 4.19).

On note que les valeurs du coefficient de diffusion D_e obtenues numériquement (à partir des essais) et celles prédites avec le modèle de Aachib et al. (2004) sont comparables (tableau 4.19). Les valeurs de D_e ajustées numériquement à partir des données expérimentales sont égales pour les deux modèles (POLLUTE et Vadose/W). On voit aussi que le modèle de Collin (équ. 2.51) surestime fortement le coefficient du taux de réaction (K_r) de l'échantillon MNOfin ($1434.\text{an}^{-1}$ contre $298.\text{an}^{-1}$, tableau 4.19). Les écarts de valeurs de K_r prédits et mesurés sont plus modérés pour les échantillons MNOmoy ($180.\text{an}^{-1}$ contre $69.\text{an}^{-1}$) et MNOgros ($91.\text{an}^{-1}$ contre $132.\text{an}^{-1}$).

La figure 4.22 compare les valeurs de K_r obtenues numériquement selon les données expérimentales et prédites selon le modèle de Collin (1987), en fonction du diamètre équivalent D_H (équ. 2.50). Le modèle de Collin postule qu'il y a une relation inversement proportionnelle entre K_r et D_H (équ. 2.51), en lien avec l'effet de la surface spécifique, mais cela ne semble pas le cas pour les essais menés sur ces échantillons de résidus (mélanges). L'annexe K présente une

analyse de ces résultats à partir des valeurs de K_r normalisées afin de tenir compte de l'influence des autres paramètres.

Tableau 4.19 : Conditions des essais de consommation d'oxygène et caractéristiques (K_r et D_e) prédites par le modèle de Collin (éq. 2.51) et celui de Aachib et al. (2004 ; éq. 2.45) et celles obtenues par ajustement des résultats expérimentaux avec POLLUTE et Vadose/W, pour les échantillons de la série 2.

Échantillons		MNOfin	MNOmoy	MNOgros
Caractéristiques	Épaisseur de l'échantillon (mm)	26,58	17,58	18,27
	Masse volumique sèche ρ_d (kg/m ³)	1142	1260	1380
	Porosité n (%)	64	59	53
	Degré de saturation S_r (%)	23	24	32
	Porosité équivalente θ_{eq} (éq. 2.39)	0,49	0,46	0,37
K_r (/an)	Prédiction Collin (éq. 2.51)	1434	180	91
	Ajustement POLLUTE	298	69	132
	Ajustement Vadose/W	300	69,4	132
D_e (m ² /an)	Prédiction Aachib et al., 2004 (éq. 2.45)	127	110	67
	Ajustement (POLLUTE et Vadose/W)	123	112	68

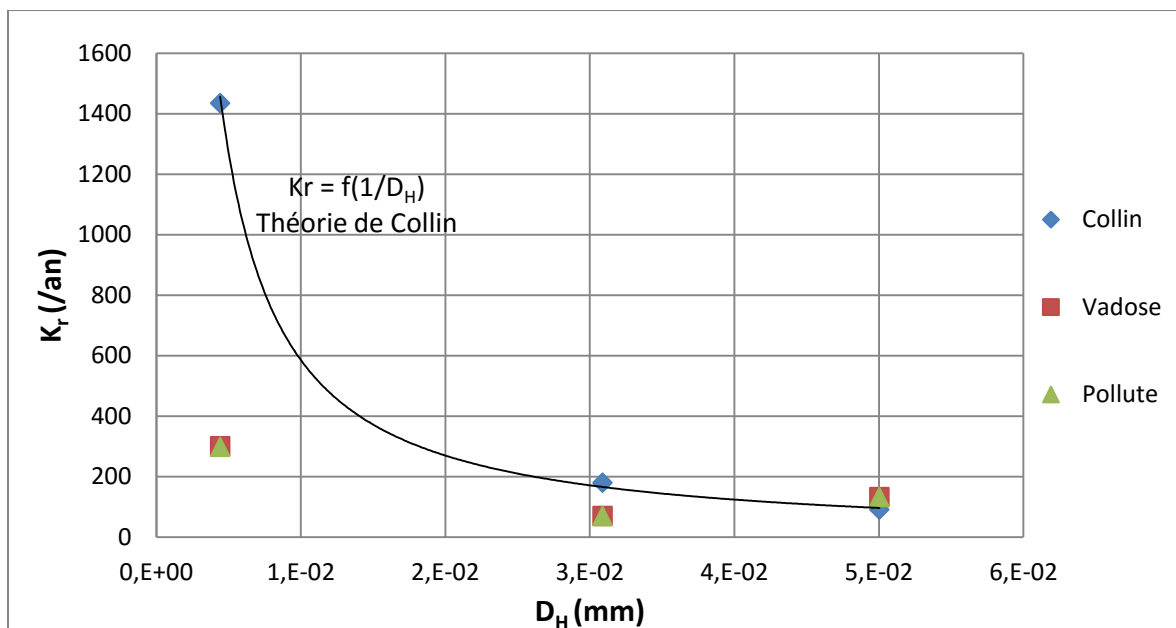


Figure 4.22 : Valeurs du coefficient du taux de réaction K_r en fonction du diamètre équivalent D_H (éq. 2.50) obtenues des données expérimentales interprétées avec POLLUTE et Vadose/W et celles prédites avec le modèle de Collin (éq. 2.51, aussi montrées par la courbe), pour les échantillons de la série 2 (tableau 4.19).

Les résultats des essais de consommation de la série 3 sont résumés aux figures 4.23, 4.24 et au tableau 4.20. Ces essais ont duré de 400 à 600 heures. La figure 4.23 présente les courbes expérimentales de la concentration en oxygène mesurée en fonction du temps ainsi que les résultats des modélisations numériques associées selon Vadose/W et POLLUTE. On observe que la baisse de concentration en oxygène est plus rapide pour le résidu MNOfin égalisé, et moins marquée pour le résidu MNOmoy égalisé.

Le tableau 4.20 indique que la valeur de réactivité calculée à l'aide des logiciels POLLUTE et Vadose/W à partir des données expérimentales augmente dans cet ordre : MNOmoy égalisé, MNOgros puis MNOfin égalisé (11 an^{-1} , 132 an^{-1} et 269 an^{-1} respectivement). Toutefois, les valeurs prédites par le modèle de Collin (éq. 2.51) suggèrent une consommation plus rapide pour l'échantillon MNOmoy égalisé que pour l'échantillon MNOgros (125 an^{-1} contre 90 an^{-1}) (tableau 4.20).

On note aussi que les valeurs du coefficient de diffusion D_e obtenues (numériquement) à partir des essais et celles prédites avec le modèle de Aachib et al. (2004) sont comparables (tableau

4.20). Les valeurs de D_e ajustées numériquement à partir des données expérimentales sont égales pour les deux modèles utilisés (i.e. POLLUTE et Vadose/W). On voit aussi que le modèle de Collin (éq. 2.51) surestime fortement le coefficient du taux de réaction K_r de l'échantillon MNOfin égalisé (1092 an^{-1} contre 269 an^{-1}) et MNOmoy égalisé (125 an^{-1} contre 11 an^{-1}) ; la valeur prédite pour l'échantillon MNOgros serait plutôt sous-estimée (90 an^{-1} contre 132 an^{-1}) (tableau 4.20).

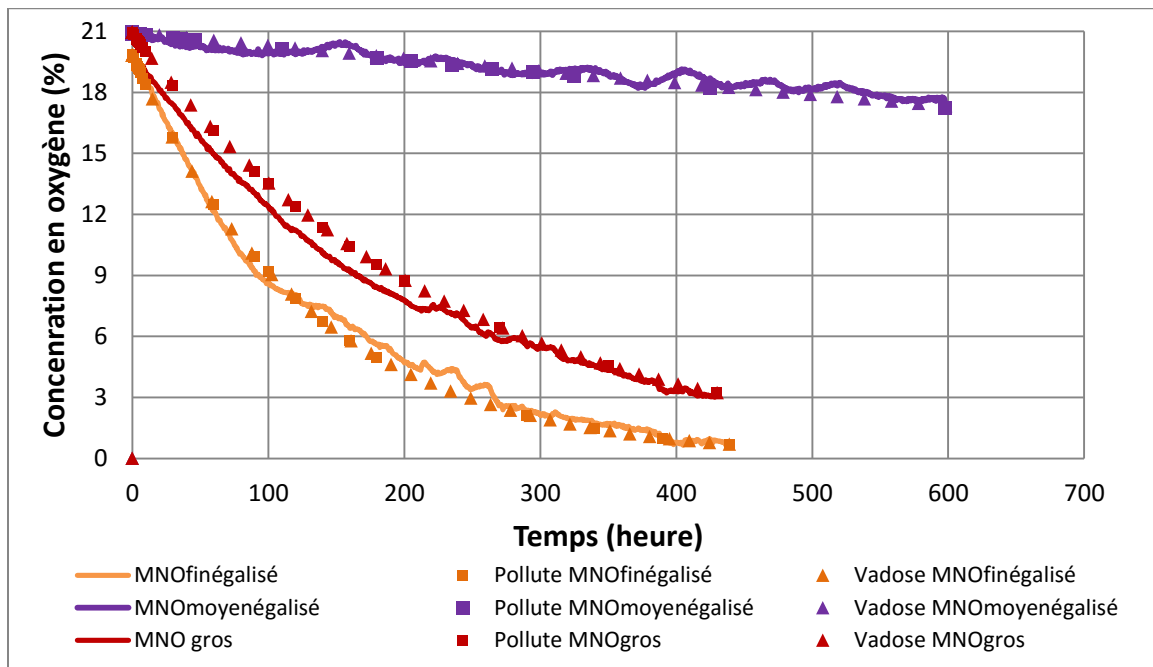


Figure 4.23 : Courbes expérimentales de la concentration mesurée d'oxygène dans le temps durant les essais de consommation d'oxygène menés sur les mélanges de résidus de la série 3 ; on montre aussi les valeurs obtenues par simulation numérique à l'aide des logiciels POLLUTE et Vadose/W (voir tableau 4.20).

La figure 4.24 compare les valeurs de K_r obtenues numériquement selon les données expérimentales et prédites selon le modèle de Collin (1987) en fonction du diamètre équivalent D_H (éq. 2.50). Le modèle de Collin postule qu'il y a une relation inversement proportionnelle entre K_r et D_H (éq. 2.51), en lien avec l'effet de la surface spécifique, mais cela ne semble pas le cas pour les essais menés sur ces échantillons de résidus (mélanges). L'annexe K présente une analyse de ces résultats à partir des valeurs de K_r normalisées afin de tenir compte de l'influence des autres paramètres.

Tableau 4.20 : Conditions des essais de consommation d'oxygène et caractéristiques (K_r et D_e) prédites par le modèle de Collin (1987, éq. 2.51) et celui de Aachib et al. (2004 ; éq. 2.45) et celles obtenues par ajustement des résultats expérimentaux avec POLLUTE et Vadose/W, pour les échantillons de la série 3.

Échantillons		MNOfin égalisé	MNOmoy égalisé	MNOgros
Caractéristiques	épaisseur de l'échantillon (mm)	20,31	17,55	18,27
	Masse volumique sèche ρ_d (kg/m ³)	1204	1203	1380
	Porosité n (%)	60	60	53
	Degré de saturation S_r (%)	26	20	32
	Porosité équivalente θ_{eq} (éq. 2.39)	0,44	0,46	0,37
K_r (/an)	Prédiction Collin (éq. 2.51)	1092	125	90
	Ajustement POLLUTE	269	11	132
	Ajustement Vadose/W	269	11	132
D_e (m ² /an)	Prédiction Aachib et al., 2004 (éq. 2.45)	103	112	67
	Ajustement (POLLUTE et Vadose/W)	100	113	68

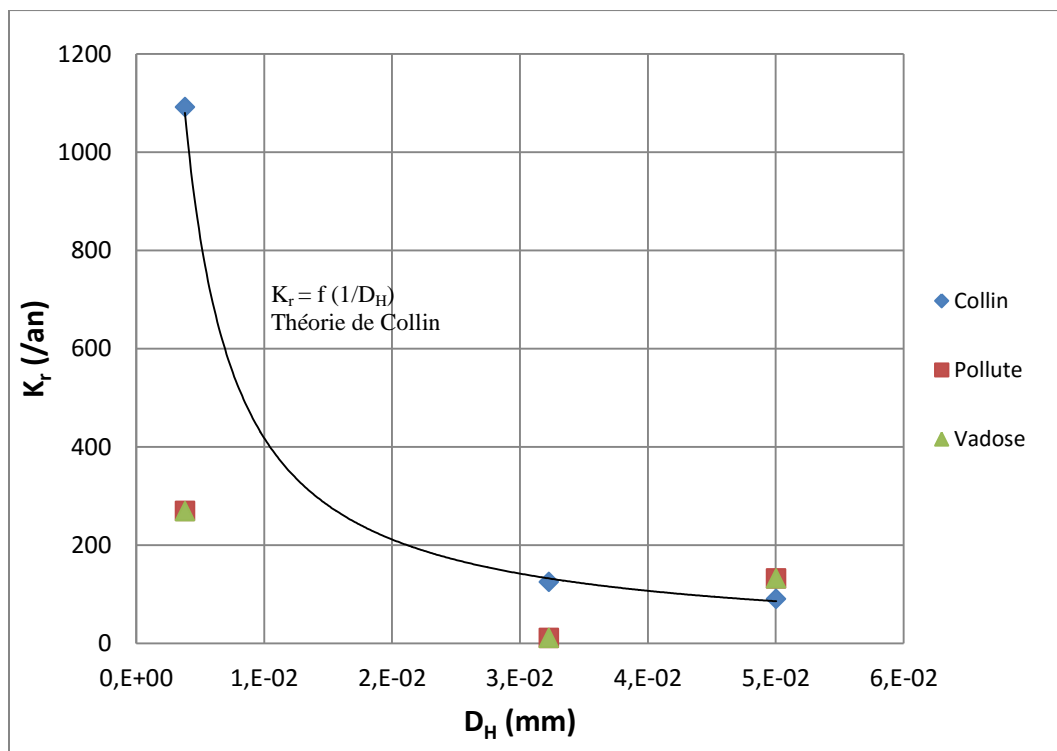


Figure 4.24 : Valeurs du coefficient du taux de réaction K_r en fonction du diamètre équivalent D_H (équ. 2.50) obtenues des données expérimentales interprétées avec POLLUTE et Vadose/W et celles prédites avec le modèle de Collin (équ. 2.51, aussi montrées par la courbe), pour les échantillons de la série 3 (tableau 4.20).

Les résultats des essais de consommation de la série 4 sont présentés aux figures 4.25, 4.26 et au tableau 4.21. Ces essais ont aussi duré de 400 à 600 heures. La figure 4.25 présente les courbes expérimentales de la concentration en oxygène mesurée en fonction du temps ainsi que les résultats des modélisations numériques associées selon Vadose/W et POLLUTE. On observe que les valeurs obtenues numériquement pour l'échantillon MNOfin-Gxfin montrent un décalage relativement marqué avec la courbe expérimentale, surtout dans la partie correspondant au milieu de l'essai (entre 100 et 400 heures). Les valeurs numériques et expérimentales initiales et finales sont toutefois identiques. On voit aussi que le résidu MNOfin-Gxgros présente la baisse de la concentration en oxygène la plus lente. L'échantillon MNOfin-Gxmoy semble consommer plus rapidement l'oxygène que le résidu MNOfin-Gxfin.

Le tableau 4.21 indique que les valeurs de réactivité K_r calculées à l'aide des logiciels POLLUTE et Vadose/W (selon les données d'essais) pour les échantillons MNOfin-Gxfin et MNOfin-

Gxmoy sont pratiquement identiques (258 an^{-1} et 265 an^{-1}). La valeur de K_r expérimentale pour le résidu MNOFin-Gxgros est plus faible (87 an^{-1}). On remarque également que les valeurs du taux de réaction K_r prédites par l'équation de Collin (eq. 2.51) sont surestimées.

Les valeurs du coefficient de diffusion D_e obtenues numériquement (à partir des essais) et celles prédites avec le modèle de Aachib et al. (2004) sont comparables (tableau 4.21). Les valeurs de D_e ajustées numériquement à partir des données expérimentales sont égales pour les deux modèles (POLLUTE et Vadose/W).

La figure 4.26 compare les valeurs de K_r obtenues (numériquement) selon les données expérimentales et prédites selon le modèle de Collin (1987, eq. 2.51) en fonction du diamètre équivalent (eq. 2.50) D_H . Le modèle de Collin postule qu'il y a une relation inversement proportionnelle entre K_r et D_H , en lien avec l'effet de la surface spécifique, mais cela ne semble pas le cas pour les essais menés sur ces échantillons de résidus (mélanges). L'annexe K présente une analyse de ces résultats à partir des valeurs de K_r normalisées afin de tenir compte de l'influence des autres paramètres.

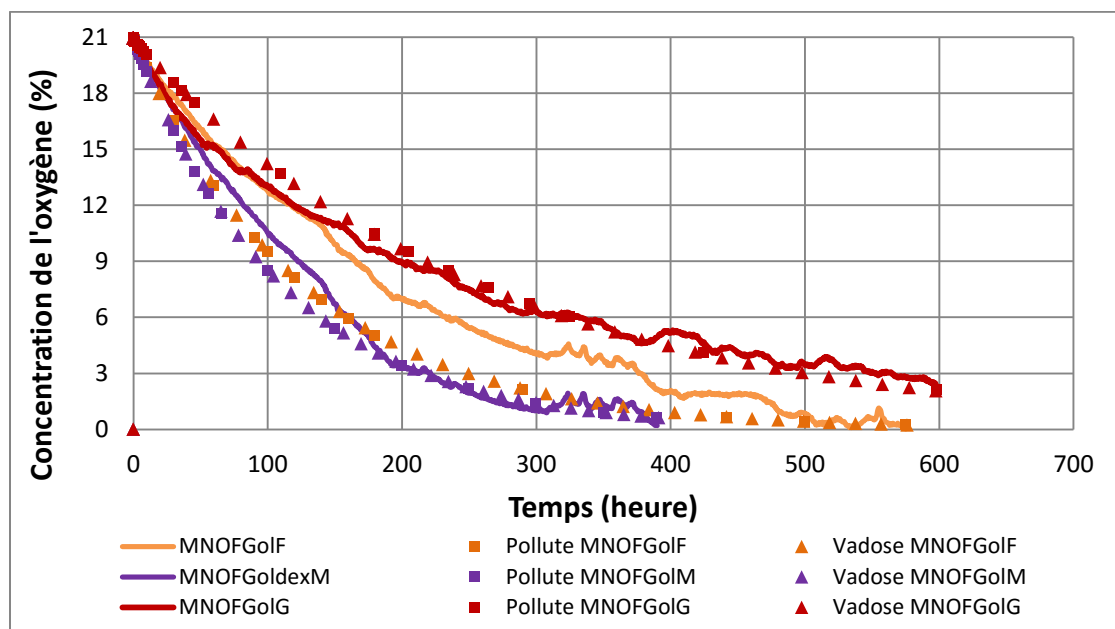


Figure 4.25 : Courbes expérimentales de la concentration d'oxygène dans le temps mesurée durant les essais de consommation d'oxygène menés sur les mélanges de résidus de la série 4 ; on montre aussi les valeurs obtenues par simulation numérique à l'aide des logiciels POLLUTE et Vadose/W (voir tableau 4.21).

Tableau 4.21 : Conditions des essais de consommation d'oxygène et caractéristiques (K_r et D_e) prédites par le modèle de Collin (1987, éq. 2.51) et celui de Aachib et al. (2004 ; éq. 2.45) et celles obtenues par ajustement des résultats expérimentaux avec POLLUTE et Vadose/W, pour les échantillons de la série 4.

Échantillons		MNOfin Gxfin	MNOfin Gxmoy	MNOfin Gxgros
Caractéristiques	Épaisseur de l'échantillon (mm)	21,65	19,74	19,25
	Masse volumique sèche (kg/m^3)	1179	1292	1489
	Porosité n (%)	60	56	49
	Degré de saturation S_r (%)	23	24	43
	Porosité équivalente θ_{eq} (éq. 2.39)	0,42	0,37	0,28
K_r (/an)	Prédiction Collin (éq. 2.51)	1038	511	251
	Ajustement POLLUTE	258	265	86
	Ajustement Vadose/W	258	265	88
D_e (m^2/an)	Prédiction Aachib et al., 2004 (éq. 2.45)	86	62	35
	Ajustement (POLLUTE et Vadose/W)	86	63	34

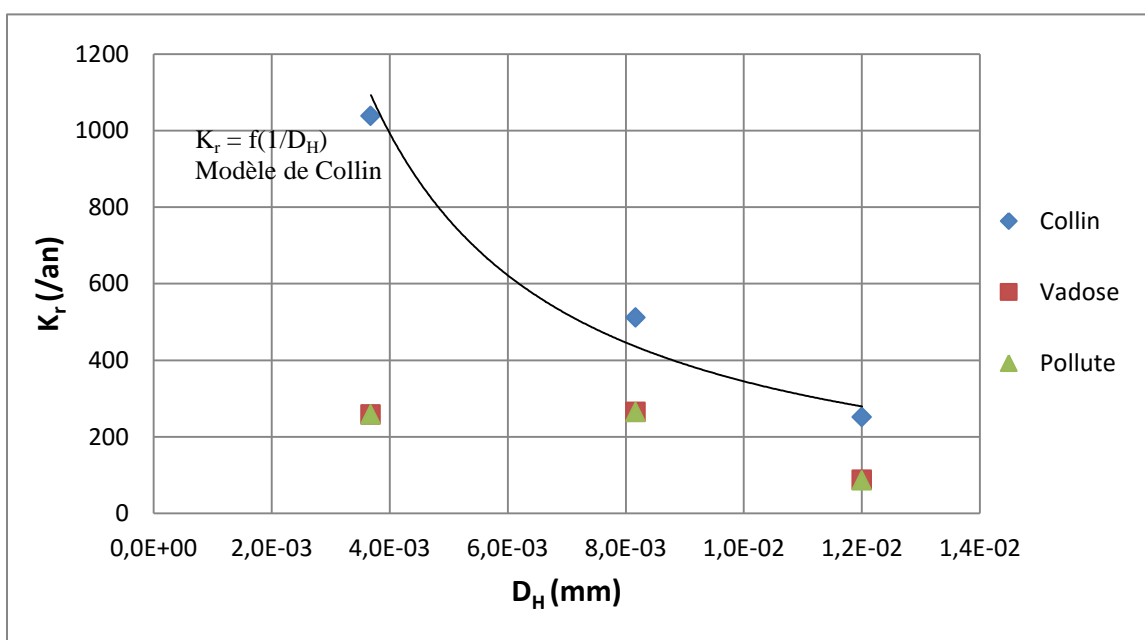


Figure 4.26 : Valeurs du coefficient du taux de réaction K_r en fonction du diamètre équivalent D_H (éq. 2.50) obtenues des données expérimentales interprétées avec POLLUTE et Vadose/W et celles prédites avec le modèle de Collin (éq. 2.51, aussi montrées par la courbe), pour les échantillons de la série 4 (tableau 4.21).

Les résultats de la série 5 sont présentés aux figures 4.27, 4.28 et aux tableaux 4.22 et 4.23. Les résultats obtenus pour les échantillons MNO et MO sont présentés séparément. La figure 4.27 présente les courbes expérimentales de la concentration en oxygène des échantillons MNO à différents degrés de saturation S_r , ainsi que les résultats des modélisations numériques associées selon Vadose/W et POLLUTE. Ces essais ont duré de 300 à 700 heures. On observe, dans un premier temps, que la baisse de la concentration en oxygène mesurée durant les essais est plus rapide quand le degré de saturation (S_r) augmente de 28% et 44%, mais elle est plus lente pour $S_r = 72\%$ et 74% .

Le tableau 4.22 indique que la valeur expérimentale de K_r déduite à l'aide des logiciels POLLUTE et Vadose/W tend à diminuer avec une augmentation de la valeur du degré de saturation S_r ($K_r = 319 \text{ an}^{-1}$, 387 an^{-1} , 32 an^{-1} et 28 an^{-1} pour des valeurs de S_r de 28%, 44%, 72% et 74% respectivement; voir aussi figure A5.5.6 de l'annexe K représentant les valeurs de K_r mesurées en fonction du degré de saturation S_r pour les échantillons MNO de la série 5). On voit aussi que le modèle de Collin (1987, éq. 2.51) surestime fortement les valeurs de K_r (presqu'un ordre de grandeur).

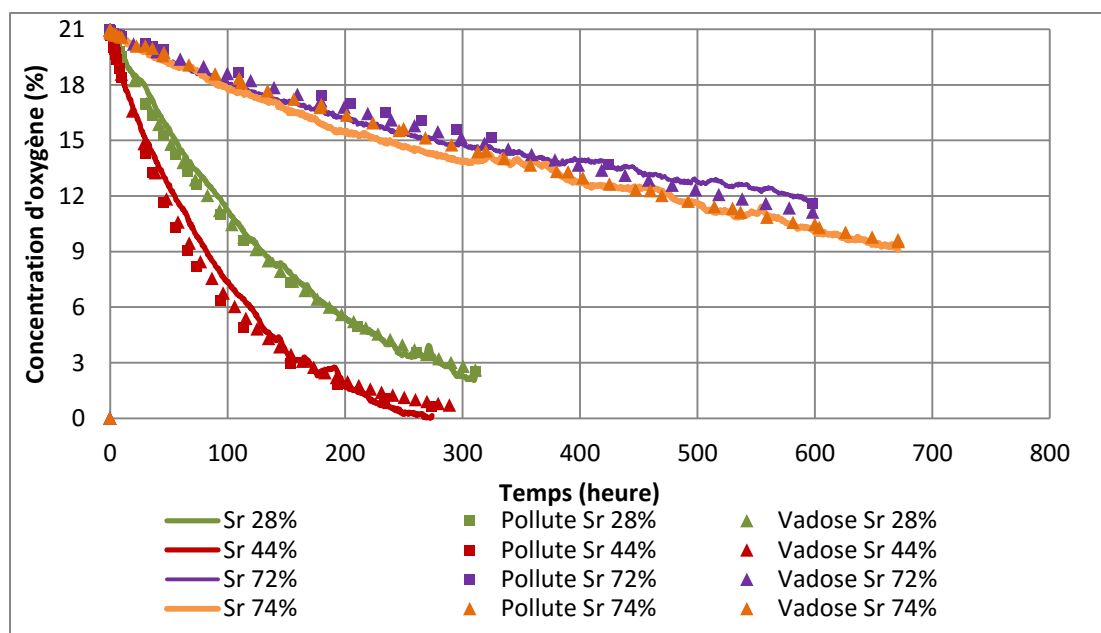


Figure 4.27 : Courbes expérimentales de la concentration d'oxygène dans le temps mesurée durant les essais de consommation d'oxygène menés sur les mélanges de résidu MNO de la série 5 ; on montre aussi les valeurs obtenues par simulation numérique à l'aide des logiciels POLLUTE et Vadose/W. (voir tableau 4.22)

Tableau 4.22 : Conditions des essais de consommation d'oxygène et caractéristiques (K_r et D_e) prédites par le modèle de Collin (éq. 2.51) et celui de Aachib et al. (2004 ; éq. 2.45) et celles obtenues par ajustement des résultats expérimentaux avec POLLUTE et Vadose/W, pour les échantillons MNO de la série 5.

Échantillons		MNO Mai	MNO Juin	MNO sat2	MNO sat3
Caractéristiques	Épaisseur (mm)	25,32	15,75	18,32	18,32
	Masse volumique sèche (kg/m^3)	1737	1432	1368	1368
	Porosité n (%)	44	54	56	56
	Degré de saturation S_r (%)	44	28	74	72
	Porosité équivalente θ_{eq} (éq. 2.39)	0,26	0,39	0,16	0,16
K_r (/an)	Prédiction Collin (éq. 2.51)	1310	1080	1030	1041
	Ajustement POLLUTE	387	319	32	28
	Ajustement Vadose/W	387	318	33	29
D_e (m^2/an)	Prédiction Aachib et al., 2004 (éq. 2.45)	29	83	4	4
	Ajustement (POLLUTE et Vadose/W)	30	83	4	4

On note également que les valeurs du coefficient de diffusion D_e obtenues numériquement (à partir des essais) et celles prédites avec le modèle de Aachib et al. (2004) sont comparables (tableau 4.22). Les valeurs de D_e ajustées numériquement à partir des données expérimentales sont les mêmes pour les deux modèles (POLLUTE et Vadose/W).

Les résultats de l'échantillon MO sont présentés à la figure 4.28 et au tableau 4.23. La figure 4.28 présente les courbes expérimentales de la concentration en oxygène pour les échantillons MO de la série 5 à différents degrés de saturation S_r ainsi que les résultats des modélisations numériques associées selon Vadose/W et POLLUTE. Ces essais ont duré de 400 à 600 heures. On voit que la faible baisse de concentration en oxygène pour chaque échantillon est très similaire.

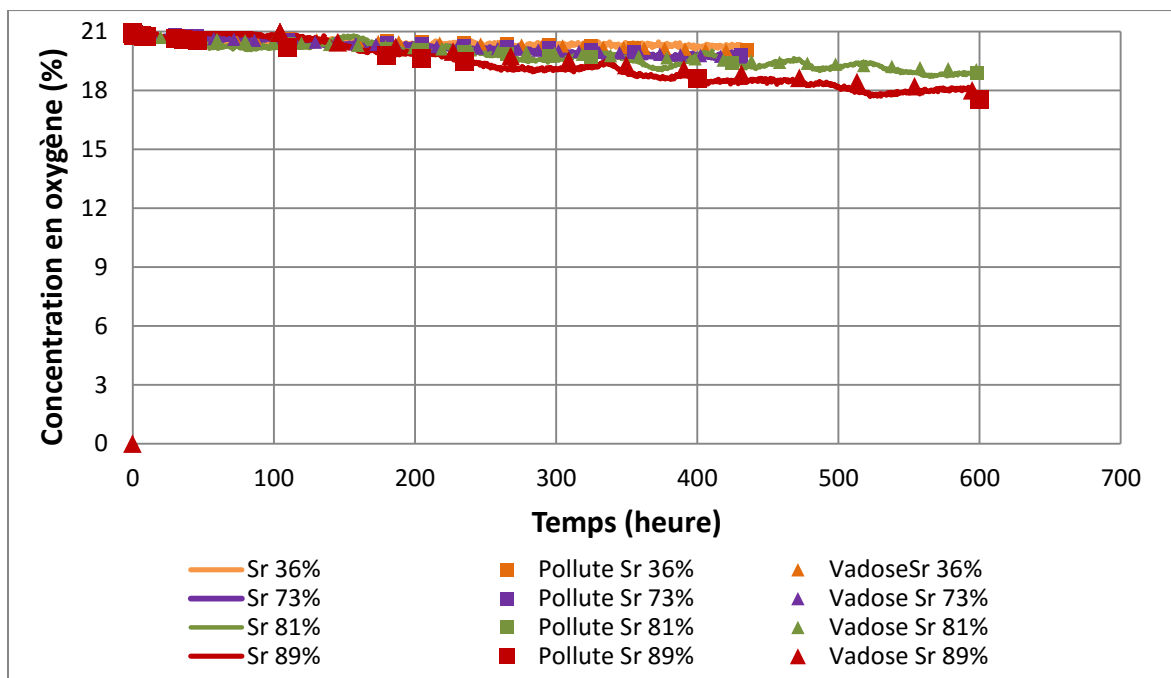


Figure 4.28 : Courbes expérimentales de la concentration d'oxygène dans le temps mesurée durant les essais de consommation d'oxygène menés sur les mélanges de résidu MO de la série 5 ; on montre aussi les valeurs obtenues par simulation numérique à l'aide des logiciels POLLUTE et Vadose/W (voir tableau 4.23).

Le tableau 4.23 indique que les valeurs de réactivité K_r , estimées numériquement avec POLLUTE et Vadose/W à partir des essais, augmentent légèrement avec le degré de saturation S_r . Les calculs montrent des valeurs de K_r de 4 an^{-1} , 6 an^{-1} , 8 an^{-1} et 15 an^{-1} pour des S_r respectifs de 36%, 73%, 81% et 89%. On voit que le modèle de Collin (1987, éq.2.51) surestime les valeurs de K_r (voir aussi la figure A5.5.7 de l'annexe K représentant les valeurs de K_r mesurées en fonction du degré de saturation S_r pour les échantillons MO de la série 5). On note aussi que les valeurs du coefficient de diffusion D_e obtenues numériquement (à partir des essais) et celles prédites avec le modèle de Aachib et al. (2004) sont comparables (tableau 4.23 et figure 4.29). Les valeurs de D_e ajustées numériquement à partir des données expérimentales sont à nouveau égales pour les deux modèles (POLLUTE et Vadose/W).

La figure 4.29 compare l'ensemble des valeurs du coefficient de diffusion obtenues numériquement suite aux essais de consommation d'oxygène, et celles prédites par le modèle de Aachib et al. (2004). Tous les résultats expérimentaux concordent bien avec le modèle prédictif.

Tableau 4.23 : Conditions des essais de consommation d'oxygène et caractéristiques (K_r et D_e) prédites par le modèle de Collin (éq. 2.51) et celui de Aachib et al. (2004 ; éq. 2.45) et celles obtenues par ajustement des résultats expérimentaux avec POLLUTE et Vadose/W, pour les échantillons MO de la série 5.

Échantillons		MO	MO sat1	MO sat 2	MO sat 3
Paramètres	Épaisseur (mm)	15,24	16,15	16,15	16,15
	Masse volumique sèche ρ_d (kg/m ³)	1345	1293	1162	1162
	Porosité n (%)	52	54	58	56
	Degré de saturation S_r (%)	36	73	89	81
	Teneur en eau volumique θ_{eq} (éq. 2.39)	0,34	0,16	0,08	0,08
K_r (/an)	Prédiction Collin (éq. 2.51)	17,7	17,0	15,3	16,8
	Ajustement POLLUTE	4,1	6,4	14,5	7,8
	Ajustement Vadose/W	4,1	6,4	14,5	7,3
D_e (m ² /an)	Prédiction Aachib et al., 2004 (éq. 2.45)	54,2	3,8	0,3	0,3
	Ajustement (POLLUTE et Vadose/W)	54,9	3,9	0,2	0,2

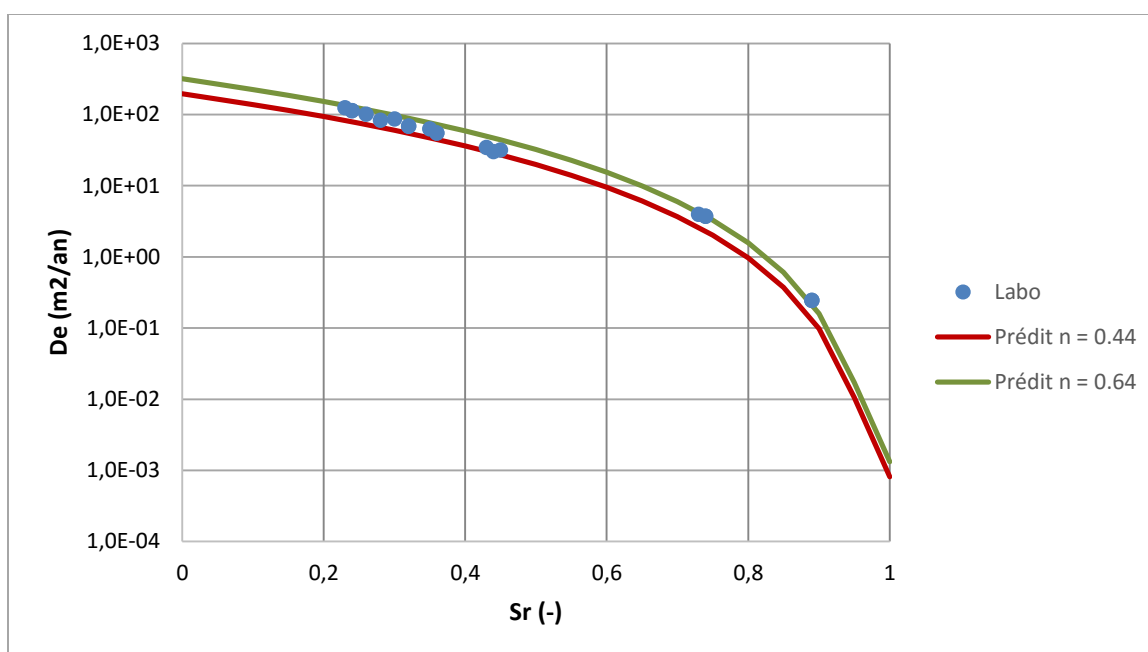


Figure 4.29 : Valeurs des coefficients de diffusion D_e (en fonction du degré de saturation) obtenues expérimentalement suite aux essais de consommation de l'oxygène et ceux prédits par le modèle de Aachib et al. (2004) pour deux valeurs de porosité n .

CHAPITRE 5 ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

5.1 Évaluation des incertitudes sur les résultats d'essais

5.1.1 Essais de diffusion de l'oxygène

Une analyse des incertitudes a été menée sur les essais de diffusion de l'oxygène selon l'approche décrite à la section 3.3.7. Les résultats sont présentés aux tableaux 5.1 et 5.2 ainsi qu'aux figures 5.1 et 5.2. Les écarts (variations) constituent ici la plus grande source d'incertitude (imprécision) pour ces essais; c'est la seule source prise en compte dans notre analyse (voir section 3.3.7).

Les épaisseurs de certains échantillons étaient parfois très minces (i.e. quelques millimètres pour MNOfin), en raison de la faible quantité des matériaux disponibles. Dans ce cas, l'imprécision de la mesure de hauteur (i.e. quelques millimètres) peut entraîner de fortes variations des caractéristiques des échantillons. Nous avons évalué les écarts relatifs entre l'épaisseur moyenne et l'épaisseur minimale/maximale pour chaque échantillon. Les valeurs des écarts relatifs sur les épaisseurs mesurées vont de 7 % (mélange MNOfin-Gxmoy) à 129 % (mélange MNOfin). Nous avons exclu de cette analyse des effets de l'incertitude les échantillons dont les écarts relatifs sur les épaisseurs mesurées dépassent une valeur jugée trop élevée (i.e. 35%) car les résultats sortent alors des tendances usuelles observées et ils sont jugés peu fiables (soit les échantillons MNO, MNO50, MNO75, MNOfin).

Le tableau 5.2 inclut les caractéristiques physiques selon l'épaisseur minimale et maximale des échantillons (pour les échantillons dont les écarts relatifs sont inférieurs à 35%). On remarque que les différences entre les épaisseurs minimales et maximales mesurées varient de 1,2 mm pour un échantillon du résidu MNOfin-Gxmoy (épaisseur minimale de 16,1 mm et maximale de 17,3 mm) à 5,6 mm pour celui du résidu MNOsat (épaisseur minimale de 13,8 mm et maximale de 19,4 mm). La différence entre les valeurs de masse volumique sèche ρ_d varie de 0,08 g/cm³ pour le résidu MNO28 (masse volumique sèche minimale de 0,79 g/cm³ et maximale de 0,88 g/cm³) à 0,57 g/cm³ pour le résidu MNOsat (masse volumique sèche minimale de 1,39 g/cm³ et maximale de 1,96 g/cm³).

Tableau 5.1 : Valeurs des épaisseurs moyenne et maximale mesurées suite aux essais de diffusion et valeurs des écarts relatifs des épaisseurs des résidus.

Échantillons		Épaisseur moyenne (mm)	Épaisseur minimale (mm)	Épaisseur maximale (mm)	Écart relatif (%)
Résidus	MNO	8,6	6,4	10,6	49
	MO	21,5	20,1	23,6	16
	Gx	18,6	17	20,2	17
Série 1	MNO28	27,8	26,2	29	10
	MNO50	8,3	6,3	10,5	50
	MNO75	9,7	7,4	12,2	49
Série 2	MNOfin	3,2	1,1	5,2	129
	MNOmoy	14,8	13,5	16,2	18
	MNOgros	23,8	21,4	25,9	19
Série 3	MNOfin égalisé	15,7	13,8	17,6	24
	MNOmoy égalisé	17,3	14,8	19,3	26
Série 4	MNOfin Gxfin	15,5	13,9	17,1	20
	MNOfin Gxmoy	16,9	16,1	17,3	7
	MNOfin Gxgros	15,2	13,9	16,2	15
Série 5	MNO sat	16,7	13,8	19,4	34
	MO sat	12,7	11	14,3	26

La différence entre les valeurs de porosité (n) déduites de ces mesures varie de 0,02 pour le résidu MNO28 (porosité minimale de 0,70, et maximale de 0,72) à 0,18 pour le résidu MNOsat (porosité minimale de 0,37 et maximale de 0,55). La différence entre les valeurs de porosité équivalente (θ_{eq}) (éq. 2.39) varie de 0,04 pour le résidu MNO28 (porosité équivalente minimale de 0,53 et maximale de 0,57) à 0,18 pour le résidu MNOmoy égalisé (porosité équivalente minimale de 0,19 et maximale de 0,37). La différence entre les valeurs du degré de saturation (S_r) déduites des mesures varie de 4% pour le résidu MNO28 (S_r minimal de 21% et maximal de 25%) à 32% pour le résidu MNOsat (S_r minimal de 68% et maximal de 100%).

La figure 5.1 montre les valeurs de D_e (moyennes) obtenues en fonction du degré de saturation S_r . On y présente aussi les valeurs prédites par le modèle de Aachib et al. (2004, éq. 2.45), à partir des valeurs de la porosité minimale et maximale de l'ensemble des échantillons testés. On illustre

également la plage d'incertitude du degré de saturation S_r déduite à partir des épaisseurs minimale et maximale de chaque échantillon. Un exemple de calcul est présenté à l'annexe G. Ces résultats indiquent qu'une imprécision de quelques millimètres (sur la mesure de l'épaisseur, à partir des hauteurs) peut entraîner une incertitude (variation) importante des valeurs de S_r et de D_e prédites (qui peut varier de plusieurs ordres de grandeur). Ces résultats montrent également que les écarts entre les valeurs de D_e prédites par le modèle de Aachib et al. (2004) et ajustées pour les échantillons MNOsat et MOSat peuvent s'expliquer par l'incertitude sur les valeurs de S_r . Seul l'échantillon MNO28 conserve un écart qui ne s'explique pas par ces incertitudes. Cet écart est lié à un problème lors de la mise en place de l'échantillon (échantillon non compacté ; $n = 0,71$).

Tableau 5.2 : Caractéristiques physiques et coefficient de diffusion D_e déterminés à partir des mesures des épaisseurs minimale et maximale des résidus soumis aux essais de diffusion de l'oxygène.

Échantillons		Épaisseur de l'échantillon (min - max) (mm)	Masse volumique sèche ρ_d (min - max) (g/cm ³)	Porosité n (min - max)	Porosité équivalente θ_{eq} (eq. 2.39) (min - max)	Degré de saturation S_r (min - max) (%)	D_e ajusté avec POLLUTE (min - max) (m ² /an)
Résidus	MO	20,1 – 23,6	1,562 - 1,834	0,34 – 0,44	0,08 – 0,22	52- 79	11 – 13
	Gx	17,0 – 20,2	1,595 - 1,893	0,31 – 0,42	0,06 – 0,21	52- 83	11 – 15
Série 1	MNO 28	26,2 – 29,0	0,792 - 0,875	0,70 – 0,72	0,53 – 0,57	21 - 25	7 – 7
Série 2	MNOmoy	13,5 – 16,2	1,341 - 1,607	0,48 – 0,57	0,26 – 0,38	34 - 48	52 – 58
	MNOgros	21,4 – 25,9	1,316 - 1,589	0,46 – 0,56	0,24 – 0,37	35 - 51	52 – 64
Série 3	MNOfin égalisé	13,8 – 17,6	1,318 - 1,675	0,44 – 0,56	0,22 – 0,39	32 - 51	49 – 68
	MNOmoy égalisé	14,8 – 19,3	1,314 - 1,709	0,43 – 0,56	0,19 – 0,37	35 - 59	36 – 65
Série 4	MNOfin Gxfin	13,9 – 17,1	1,329 - 1,630	0,44 – 0,55	0,17 – 0,32	42 - 64	37 – 42
	MNOfin Gxmoy	16,1 – 17,3	1,603 - 1,724	0,41 – 0,45	0,19 – 0,24	48 - 56	21 - 24
	MNOfin Gxgros	13,9 – 16,2	1,674 - 1,946	0,33 – 0,42	0,04 – 0,17	62 - 92	2,8 – 3,3
Série 5	MNO sat	13,8 – 19,44	1,39 - 1,96	0,37 – 0,55	0,01 – 0,19	68 - 100	0,6 – 0,9
	MO sat	11,0 – 14,3	1,45 - 1,89	0,32 – 0,48	0,01 – 0,15	70 - 100	10 – 11,9

La différence entre les valeurs du coefficient de diffusion effectif (D_e) (dédit des simulations en considérant l'épaisseur minimale et maximale selon l'équation 2.45 décrite à la section 2.3.2 ; tableau 5.2) varie de $0 \text{ m}^2.\text{an}^{-1}$ pour le résidu MNO28 (valeur de $7 \text{ m}^2.\text{an}^{-1}$) à $29 \text{ m}^2.\text{an}^{-1}$ pour le résidu MNOMoy égalisé (valeurs minimale de $36 \text{ m}^2.\text{an}^{-1}$ et maximale de $65 \text{ m}^2.\text{an}^{-1}$). Un exemple détaillé de calcul est présenté à l'annexe H. Ceci montre que l'imprécision de quelques millimètres (sur les mesures de hauteur) n'engendre qu'une incertitude relativement faible sur les valeurs de D_e ajustées déduites des simulations. Ceci est lié au processus d'itération pour ajuster la valeur de D_e . En effet, les paramètres mesurés et entrés dans le logiciel (notamment θ_{eq}) prennent bien en compte les états de saturation de l'échantillon. Cependant, le processus d'itération entraîne un ajustement de la valeur de D_e qui tend vers la valeur ajustée moyenne de l'essai (voir annexe H).

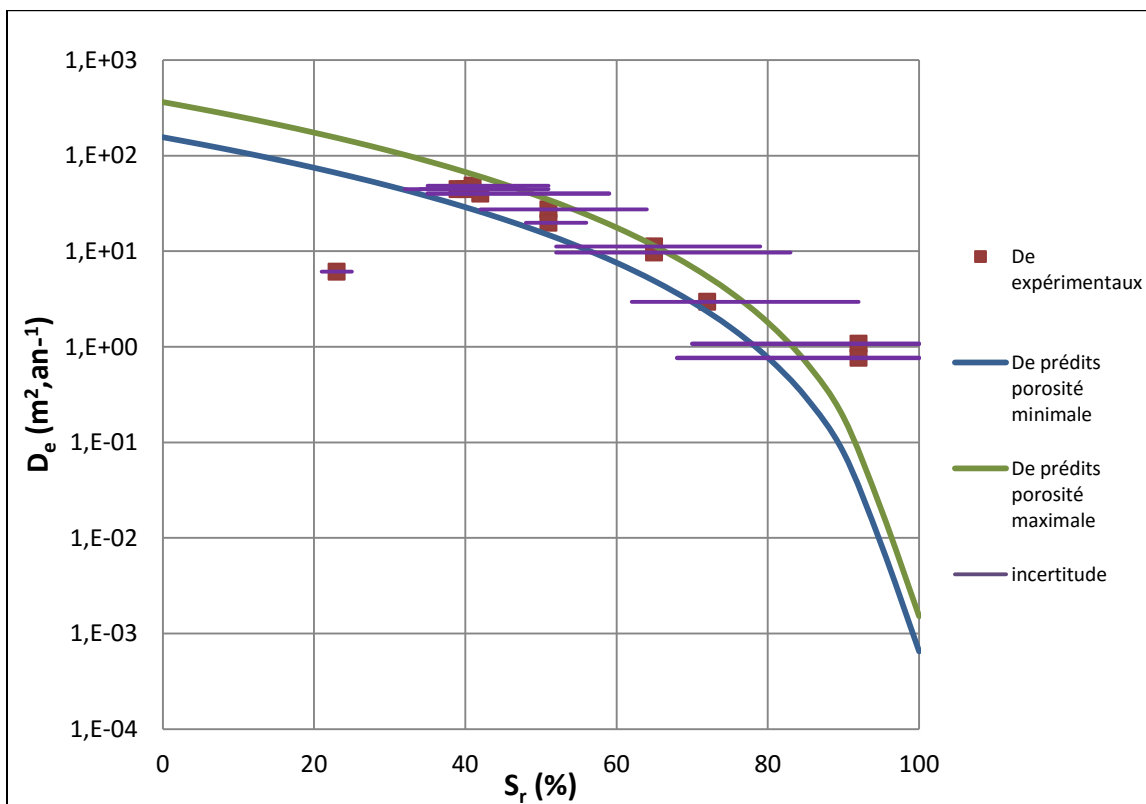


Figure 5.1 : Valeurs du coefficient de diffusion en fonction du degré de saturation obtenues expérimentalement suite aux essais de diffusion de l'oxygène et ceux prédits par le modèle de Aachib et al. (2004); on montre aussi la plage d'incertitude (variation selon les mesures) sur le degré de saturation (S_r) (voir tableau 5.2 et détails de calculs à l'annexe G)

Pour résumer, les imprécisions sur les mesures de l'épaisseur de l'échantillon (à partir des hauteurs) entraînent une incertitude importante sur l'estimation du paramètre S_r (voir exemple de calcul à l'annexe G). Cette incertitude permet d'expliquer les écarts observés entre les valeurs du coefficient de diffusion D_e prédites par le modèle de Aachib et al. (2004) et celles mesurées expérimentalement. Le modèle, compte tenu de l'incertitude (voir exemple de calcul à l'annexe H), prédit donc bien les valeurs de D_e mesurées. L'incertitude sur le paramètre S_r ne se répercute pas sur la détermination des valeurs de D_e mesurées, notamment grâce au processus d'itération.

Il est important de noter que le modèle de Aachib et al. (2004) est utilisé pour déterminer la valeur de D_e à considérer lors des simulations numériques des essais de consommation. Il est donc important de vérifier l'impact de l'incertitude du paramètre S_r sur la prédiction de la valeur de D_e par le modèle de Aachib et al. (2004) lors des essais de consommation. Cette vérification est faite à la section suivante (5.1.2).

5.1.2 Essais de consommation de l'oxygène

L'analyse de l'incertitude pour les essais de consommation d'oxygène est utile pour statuer sur la précision des résultats et aider à interpréter ces résultats et les tendances qui en découlent. L'analyse présentée ici porte sur deux paramètres. La première évaluation porte sur la détermination du coefficient de diffusion effectif de l'oxygène (D_e) et la seconde est axée sur le coefficient du taux de réaction (K_r). Les valeurs de ces incertitudes pour les essais de consommation de l'oxygène sont présentés au tableau 5.3 et aux figures 5.3 et 5.4.

Le tableau 5.3 fournit les valeurs de l'épaisseur minimale et maximale respectivement, pour chaque échantillon; ces valeurs peuvent affecter l'évaluation de D_e et K_r . On considère ici que l'imprécision liée à la mesure du volume (épaisseur) des éprouvettes est la cause principale (origine) de l'incertitude, qui est ainsi évaluée à partir de la plage de variation des valeurs correspondantes de l'épaisseur (voir section 3.3.7).

La différence entre les épaisseurs minimales et maximales varie de 1,4 mm pour l'essai sur le mélange MNOfin Gxgros (épaisseur minimale de 18,6 mm et maximale de 20,0 mm) à 5,0 mm pour celui sur le résidu MNO Juin (épaisseur minimale de 13 mm et maximale de 18,0 mm). La différence entre les valeurs de masse volumique sèche ρ_d varie de 0,09 g.cm⁻³ pour l'essai sur le mélange MNOfin Gxmoy (masse volumique minimale de 1,25 g.cm⁻³ et maximale de

1,34 g.cm⁻³) à 0,48 g.cm⁻³ pour celui sur le résidu MNO Juin (masse volumique minimale de 1,25 g.cm⁻³ et maximale de 1,73 g.cm⁻³). La différence entre les valeurs de la porosité (n) varie de 0,03 pour l'essai sur le mélange MNOfin Gxmoy (porosités minimale de 0,54 et maximale de 0,57) à 0,16 pour celui sur le résidu MNO Juin (porosités minimale de 0,44 et maximale de 0,60). La différence entre les valeurs de la teneur en eau volumique (θ_w) varie de 0,01 pour l'essai sur le résidu MNO50 (valeurs minimale de 0,17 et maximale de 0,18) à 0,08 pour celui sur le résidu MNO sat2 (valeurs minimale de 0,37 et maximale de 0,45). La différence entre les valeurs du degré de saturation (S_r) varie de 4% pour l'essai sur le résidu MNOfin Gxmoy (valeurs minimale de 33% et maximale de 37%) à 25% pour celui sur le résidu MNO sat2 (valeurs minimale de 62% et maximale de 87%). La différence (écart) entre les valeurs du coefficient de diffusion effectif (D_e) prédit varie de 1 m².an⁻¹ pour l'essai sur le résidu MO sat2 (valeurs minimale de 0,002 m².an⁻¹ et maximale de 1 m².an⁻¹) à 87 m².an⁻¹ pour celui sur le résidu MNO Juin (valeurs minimale de 35 m².an⁻¹, et maximale de 122 m².an⁻¹). Les valeurs ajustées minimale et maximale du coefficient de diffusion D_e sont obtenues numériquement avec POLLUTE (Rowe et al., 1994) à partir des valeurs expérimentales limites (épaisseur, densité sèche ρ_d , teneur en eau volumique θ_w) pour les échantillons testés. On observe que les valeurs ajustées et prédites de D_e sont identiques.

La figure 5.2 montre les valeurs expérimentales moyennes de D_e , l'incertitude sur le degré de saturation S_r et celle sur la valeur de D_e ajustée numériquement, pour chaque échantillon. Un exemple détaillé est présenté à l'annexe G. Comme pour les essais de diffusion, ces résultats montrent qu'une différence de hauteur de quelques millimètres (due à une imprécision de la mesure de l'épaisseur de l'échantillon) peut entraîner une incertitude importante sur les valeurs de S_r . On remarque aussi que cette imprécision se répercute sur la détermination du coefficient de diffusion, ce qui n'était pas le cas lors des essais de diffusion. Plus le degré de saturation augmente, plus les incertitudes sur la valeur de S_r se répercutent sur l'incertitude sur la valeur de D_e . On remarque que la plage d'incertitude (variation) sur la valeur de D_e pour le plus haut degré de saturation (échantillon MO sat2 et MO sat3) est relativement limitée. Rappelons ici que ces valeurs de D_e ont été obtenues par ajustement numérique (itération) selon les données expérimentales ; ce ne sont pas des valeurs prédites à partir d'une solution analytique (comme le modèle de Aachib et al. 2004).

Comme mentionné à la fin de la section précédente (5.1.1), lors des essais de consommation d'oxygène, la valeur de D_e prédite par le modèle de Aachib sert de référence pour l'ajustement du paramètre K_r (comme nous le montre le tableau 5.3). Il est donc important de vérifier si les incertitudes sur le paramètre D_e influence la détermination du paramètre K_r .

Le tableau 5.3 montre que la différence entre les valeurs du coefficient du taux de réaction (K_r) varie de 1 an^{-1} pour l'essai sur le résidu MNOMoy égalisé (valeurs minimale de 9 an^{-1} et maximale de 10 an^{-1}) à 105 an^{-1} pour celui sur le résidu MNO Juin (valeurs minimale de 285 an^{-1} et maximale de 390 an^{-1}).

Tableau 5.3 : Caractéristiques physiques et valeurs des coefficients de diffusion D_e et du taux de réaction K_r des résidus déduites suite aux essais de consommation d'oxygène; valeurs obtenues à partir des épaisseurs minimale et maximale des éprouvettes

Échantillons		Épaisseur min -max (mm)	Masse vol. sèche ρ_d min-max (g.cm ⁻³)	Degré de sat. S_r min- max (%)	Porosité n min-max	TEV θ_w min-max	D_e prédit avec Aachib et al. (2004) (min - max) (m ² /an)	D_e ajusté avec POLLUTE (min - max) (m ² /an)	K_r ajusté avec POLLUTE (min - max) (/an)
Série 1	MNO Mai	24,5-26,3	1,67-1,80	40-47	0,42-0,46	0,19-0,20	22-36	23-38	385-400
	MNO Juin	13,0-18,0	1,25-1,73	22-41	0,44-0,60	0,13-0,18	35-122	35-121	285-390
	MNO 28	24,9-27,5	1,34-1,48	33-40	0,49-0,53	0,17-0,19	44-64	42-66	160-182
	MNO 50	30,2-32,7	1,29-1,40	30-35	0,52-0,56	0,17-0,18	58-74	57-77	269-301
	MNO 75	22,9-25,8	1,45-1,63	40-52	0,46-0,52	0,21-0,24	20-42	19-43	299-332
Série 2	MNOfin	24,9-27,9	1,09-1,22	22-26	0,61-0,65	0,14-0,16	108-135	105-137	282-333
	MNOmoy	16,0-19,2	1,15-1,39	20-28	0,55-0,63	0,13-0,15	87-132	85-138	58-70
	MNOgros	17,1-19,5	1,29-1,48	28-36	0,50-0,56	0,16-0,18	53-83	51-86	124-142
Série 3	MNOfin égalisé	19,1-21,5	1,14-1,28	24-29	0,57-0,62	0,15-0,17	81-110	84-116	231-256
	MNOmoy égalisé	16,5-18,8	1,12-1,28	21-27	0,57-0,63	0,14-0,15	97-127	95-133	9-10
Série 4	MNOfin Gxfin	20,6-22,3	1,14-1,24	28-32	0,58-0,61	0,17-0,19	72-96	73-95	254-270
	MNOfin Gxmoy	19,0-20,4	1,25-1,34	33-37	0,54-0,57	0,19-0,20	52-70	53-71	244-251
	MNOfin GxGros	18,6-20,0	1,43-1,54	40-47	0,47-0,51	0,21-0,22	28-40	27-43	75-80
Série 5	MO	13,1-17,5	1,18-1,57	28-49	0,44-0,58	0,16-0,21	25-79	22-91	3-5
	MO sat	15,2-17,3	1,21-1,38	64-82	0,51-0,57	0,36-0,41	2-8	1-10	6-9
	MO sat2	15,2-17,3	1,09-1,24	80-100	0,56-0,61	0,49-0,55	0,002-1	0,001-2	14-54
	MO sat3	15,2-17,3	1,09-1,24	80-100	0,56-0,61	0,49-0,55	0,002-1	0,001-2	8-16
	MNO sat2	16,7-20,2	1,24-1,50	62-87	0,52-0,60	0,37-0,45	0,5-9,4	0,4-12	30-40
	MNO sat3	16,7-20,2	1,24-1,50	62-87	0,52-0,60	0,37-0,45	0,5-9,4	0,4-12	23-29

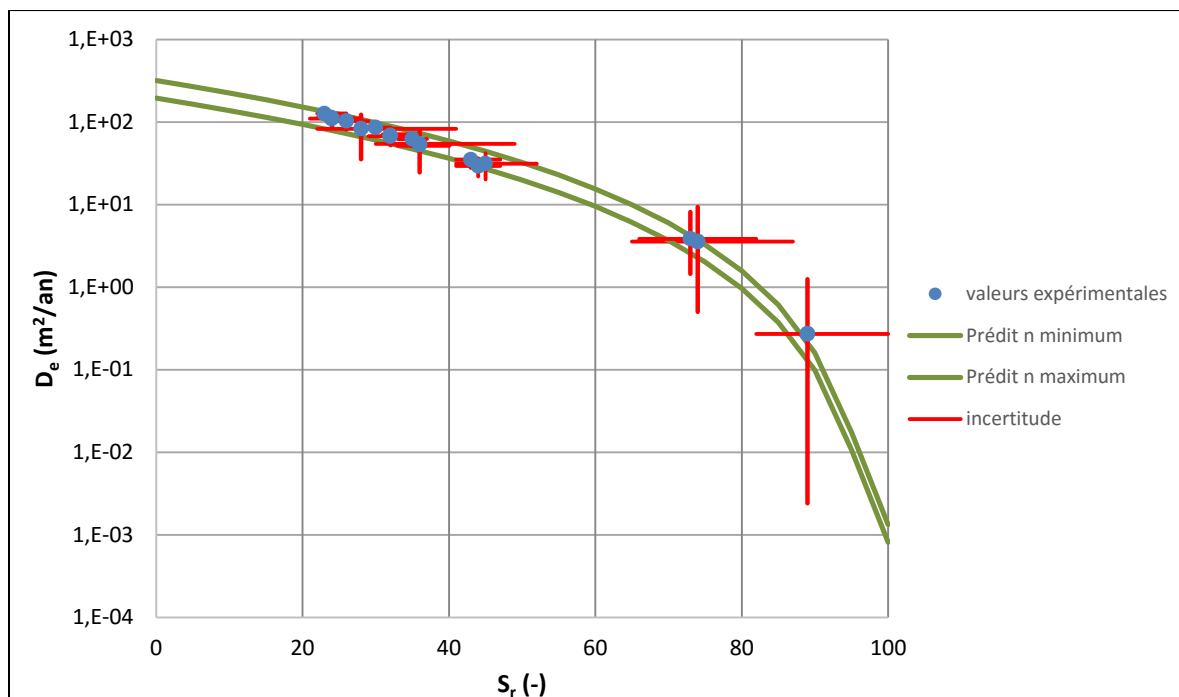


Figure 5.2 : Valeurs du coefficient de diffusion obtenues suite aux essais de consommation de l’oxygène et ceux prédits par le modèle de Aachib et al. (2004); on montre aussi la plage d’incertitude sur le degré de saturation (S_r) ainsi que celle sur le coefficient de diffusion D_e prédit (voir tableau 5.3).

La figure 5.3 présente les valeurs de K_r obtenues expérimentalement avec leur plage de variation selon l’imprécision des mesures sur l’épaisseur de l’échantillon. Ces valeurs sont présentées selon un ordre croissant des valeurs de S_r . On remarque que la plage d’incertitude du paramètre K_r est plus élevée pour les échantillons les plus saturés (MO sat2 et MO sat3, $S_r = 89\%$). Cependant, il ne semble pas y avoir une influence notable de S_r sur l’incertitude de K_r . Ceci est en accord avec le fait que la valeur du taux de réaction K_r ne dépend pas du degré de saturation S_r (pour les valeurs de S_r testées ici ; voir Gosselin, 2007).

La figure 5.4 présente les valeurs de K_r obtenues expérimentalement avec leur plage de variation selon l’imprécision des mesures. Ces valeurs sont présentées par type de matériaux. Les valeurs prédites par le modèle de Collin (1987, éq. 2.51) sont également présentées. La plage d’incertitude du taux de réaction K_r ne semble pas expliquer les écarts entre le modèle prédictif et les résultats expérimentaux.

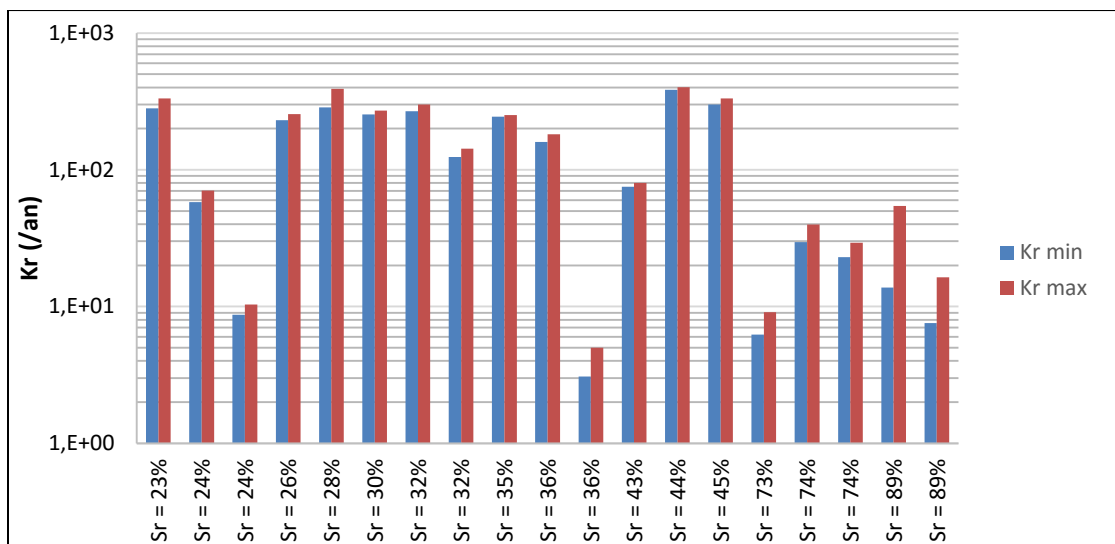


Figure 5.3 : Valeurs du coefficient du taux de réaction K_r minimum et maximum obtenues des essais de consommation de l'oxygène selon les épaisseurs minimales et maximales des éprouvettes ; ces valeurs sont présentées selon un ordre croissant du degré de saturation S_r (tableau 5.3).

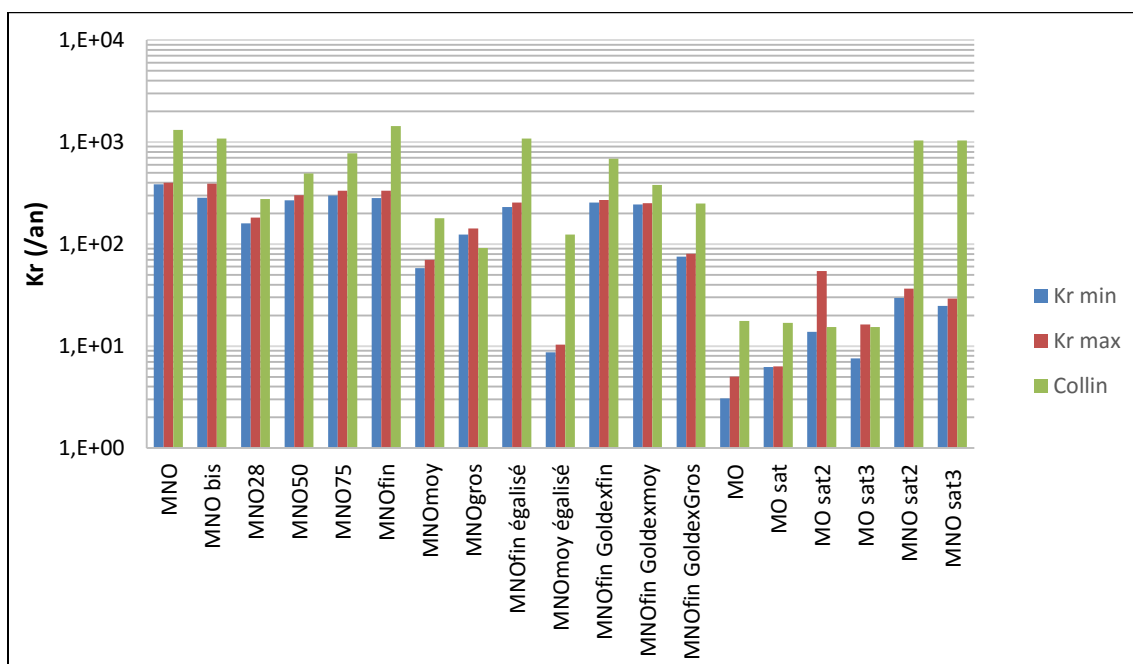


Figure 5.4 : Valeurs du coefficient du taux de réaction K_r minimum et maximum obtenues des essais de consommation de l'oxygène selon les épaisseurs minimales et maximales des éprouvettes; les valeurs prédites par le modèle de Collin (1987) sont également présentées (tableau 5.3)

On observe que l'écart entre les valeurs expérimentales de K_r et celles prédites est particulièrement élevé pour les échantillons fortement saturés du résidu MNO (MNO sat2 et MNO sat3, avec $S_r > 80\%$).

Les incertitudes ont aussi été évaluées série par série pour le paramètre K_r . Les valeurs ajustées minimale et maximale du coefficient du taux de réaction K_r sont obtenues numériquement avec POLLUTE (Rowe et al., 1994) à partir des caractéristiques issues des mesures (épaisseur, masse volumique sèche ρ_d , teneur en eau volumique θ_w) selon les valeurs minimale et maximale pour les échantillons testés. De même, les valeurs prédites minimales et maximales de K_r sont calculées selon le modèle de Collin (1987, éq. 2.51) à partir des mêmes valeurs minimale et maximale. Un exemple d'analyse est en détail à l'annexe I pour le résidu MNO50 afin d'illustrer l'approche utilisée. Dans ce cas-ci, on reprend la plage d'imprécision pour le paramètre ciblé (ici C_p , voir section 4.3.2) et celle de la réactivité (K_r) obtenue des simulations avec POLLUTE. Les incertitudes déduites pour les prédictions du paramètre K_r (voir annexe I) sont présentées dans le tableau 5.4. Les valeurs minimales de K_r (prédites et mesurées) sont obtenues à partir de la valeur maximale de l'épaisseur de l'échantillon; les valeurs maximales de K_r sont obtenues à partir de la valeur minimale de l'épaisseur. Les valeurs prédites du coefficient du taux de réaction K_r pour cet échantillon sont comprises entre 483 et 504 (an^{-1}). Les valeurs ajustées numériquement (à partir de POLLUTE) oscillent entre 268 et 301 (an^{-1}).

La figure 5.5 présente les valeurs du taux de réaction K_r mesurées et prédites en fonction du degré de saturation S_r pour le résidu MNO50. Les plages d'imprécision sur le paramètre S_r et l'imprécision qui en résulte pour le paramètre K_r sont également présentées. On constate ici que les écarts entre la valeur de K_r prédite par le modèle de Collin (1987) et celle obtenue expérimentalement ne peuvent pas être attribués aux incertitudes considérées ici pour ce matériau (et pour les autres). Ces écarts pourraient être attribuables à la valeur de la réactivité intrinsèque K' , qui est considérée comme une valeur constante dans le modèle de Collin (voir section XXX)

Tableau 5.4 : Valeurs du coefficient du taux de réaction K_r prédites et obtenues à partir des données expérimentales (épaisseurs minimales, maximales et moyennes) pour chaque échantillon, suite aux essais de consommation d'oxygène (voir aussi exemple de calcul à l'annexe I).

Échantillons		K_r Collin min (an^{-1})	K_r Collin moyen (an^{-1})	K_r Collin max (an^{-1})	K_r min obtenu avec POLLUTE (an^{-1})	K_r moyen obtenu avec POLLUTE (an^{-1})	K_r max obtenue avec POLLUTE (an^{-1})
Série 1	MNO	1314	1267	1337	387	385	400
	MNO bis	1079	938	1243	319	285	390
	MNO 28	275	264	281	176	160	182
	MNO 50	493	483	504	287	268	301
	MNO 75	778	732	808	300	299	332
Série 2	MNOfin	1434	1395	1514	299	281	333
	MNOmoy	180	166	193	69	58	70
	MNOgros	91	85	95	132	124	142
Série 3	MNOfin égalisé	1083	1056	1137	269	231	256
	MNOmoyen égalisé	124	118	134	11	9	10
Série 4	MNOfin Gxfin	685	668	720	258	254	270
	MNOfin Gxmoy	380	371	389	265	244	251
	MNOfin GxGros	250	245	260	87	75	80
Série 5	MO	18	16	20	4	3	5
	MO sat	17	16	18	6	6	6
	MO sat2	15	15	16	15	14	54
	MO sat3	15	15	16	8	8	16
	MNO sat 2	1032	962	1126	32	30	37
	MNO sat3	1032	962	1126	28	25	29

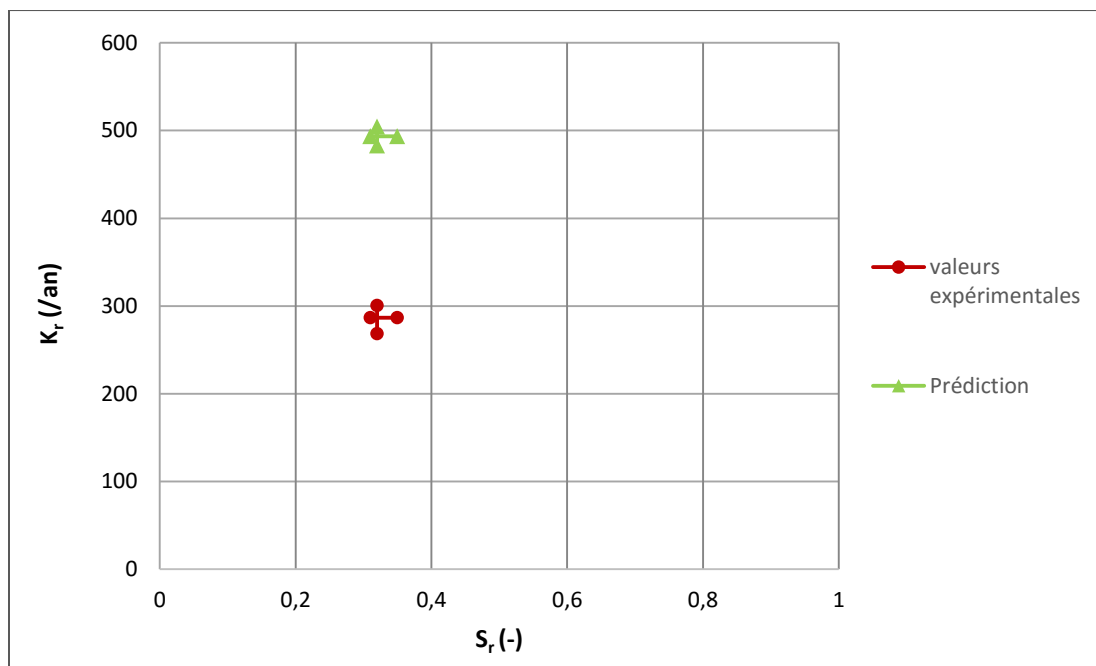


Figure 5.5 : Valeurs du coefficient du taux de réaction K_r obtenues suite aux essais de consommation de l'oxygène et celles prédites par le modèle de Collin (1987) en fonction du degré de saturation S_r , pour le résidu MNO50 ; on montre aussi la plage d'incertitude pour les paramètres S_r et K_r (voir tableau 5.4 et détails à l'annexe I).

L'ensemble des valeurs obtenues et des incertitudes obtenues pour la série 1 est présenté à la figure 5.6. On constate que les incertitudes n'expliquent pas la différence entre les valeurs de K_r prédites et obtenues expérimentalement. Dans tous les cas, le modèle de Collin (1987) surestime les valeurs de K_r . De même, la relation proportionnelle entre K_r et C_p ne ressort pas clairement ici (voir aussi relations normalisées présentées à l'annexe K).

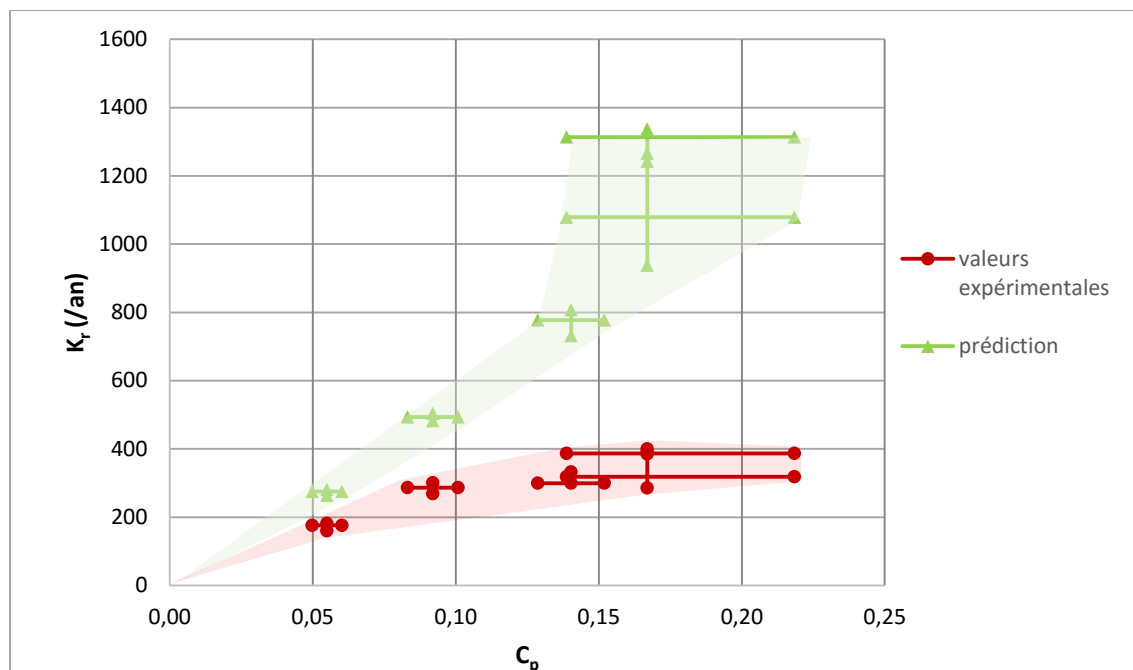


Figure 5.6 : Valeurs du coefficient du taux de réaction K_r obtenues suite aux essais de consommation de l'oxygène et celles prédites par le modèle de Collin (1987) en fonction de la teneur en pyrite C_p pour les résidus de la série 1 ; on montre aussi la plage d'incertitude obtenue pour les paramètres C_p et K_r . (détail des calculs à l'annexe I).

Les incertitudes déterminées selon la même approche pour les essais de consommation des séries 2, 3 et 4 sont présentées (en fonction du diamètre équivalent D_H) à la figure 5.7 (voir résultats détaillés à l'annexe J). À nouveau, la différence entre les valeurs prédites et obtenues expérimentalement ne s'explique pas par ces incertitudes pour les séries 2 et 3; le modèle de Collin (1987) surestime les valeurs de K_r . On constate aussi que la linéarité entre K_r et D_H ne peut pas être confirmée à partir de ces résultats. Les résultats de la série 4 montrent que les valeurs de réactivité prédites pour les échantillons MNOfin Gxmoy et MNOfin Gxgros montrent une bonne concordance avec les valeurs expérimentales. On remarque aussi que pour des diamètres $D_H < 10^{-2}$ mm les valeurs de K_r ne semblent pas suivre la tendance découlant du modèle utilisé ici (i.e pour des valeurs théoriques de $K_r > 200 \cdot \text{an}^{-1}$). L'annexe K présente une analyse de ces résultats à partir des valeurs de K_r normalisées afin de tenir compte de l'influence des autres paramètres.

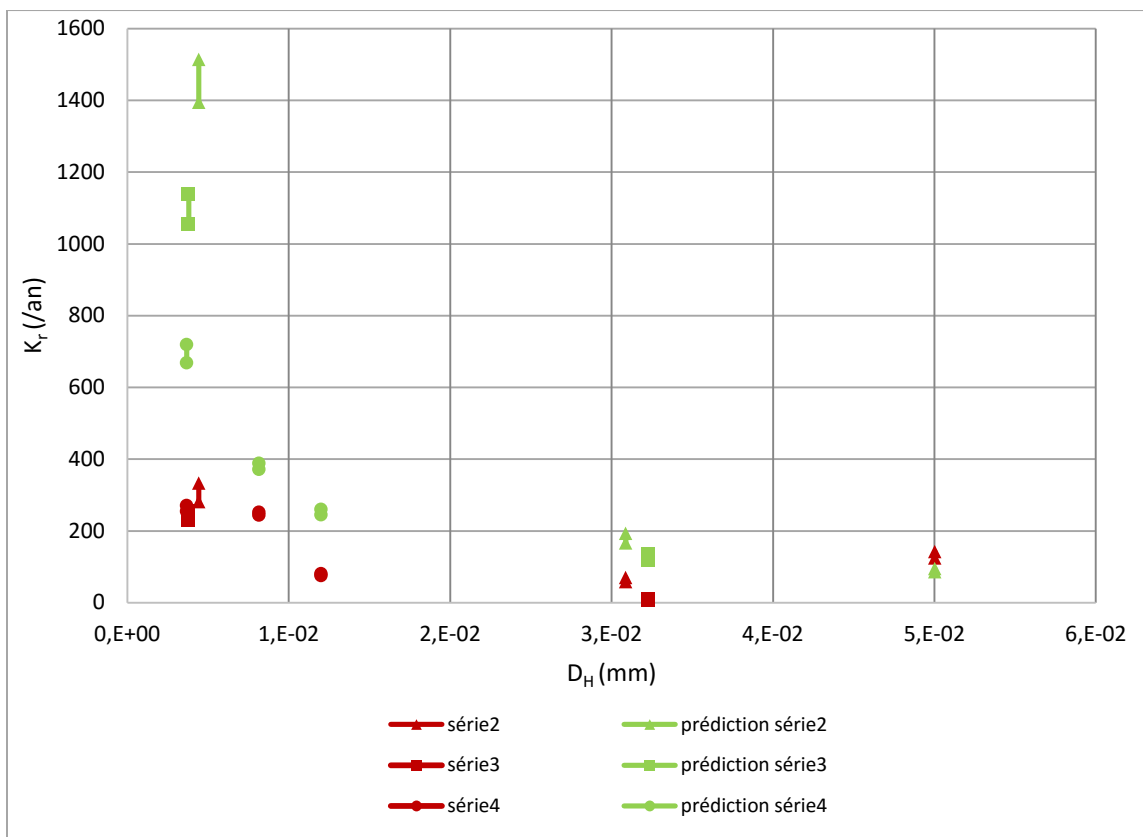


Figure 5.7 : Valeurs des coefficients du taux de réaction K_r obtenues suite aux essais de consommation de l'oxygène et celles prédites par le modèle de Collin (1987) en fonction du diamètre équivalent D_H pour les résidus des séries 2, 3 et 4 ; on montre aussi la plage d'incertitude obtenue pour le paramètre K_r (voir le détail des calculs à l'annexe J).

Pour résumer, les résultats montrent qu'une différence de hauteur de quelques millimètres (due à une imprécision de la mesure de l'épaisseur de l'échantillon) peut entraîner une incertitude importante sur les valeurs de S_r . On remarque aussi que cette imprécision se répercute sur la détermination du coefficient de diffusion, ce qui n'était pas le cas lors des essais de diffusion. Cette imprécision ne semble cependant pas avoir d'influence notable sur l'incertitude de K_r . Cela est lié à la nature même des essais. Lors d'un essai à un seul réservoir, il n'y a pas de gradient de concentrations imposé, c'est la consommation de l'oxygène qui crée un gradient. Les variations du paramètre D_e auront donc peu de répercussions sur l'ajustement par itération des courbes expérimentales et numériques, contrairement au paramètre K_r qui, lui, est indépendant du paramètre S_r (pour les valeurs de S_r testées ici ; voir Gosselin, 2007).

La plage d'incertitude du taux de réaction K_r ne semble pas expliquer les écarts entre le modèle prédictif et les résultats expérimentaux. La proportionnalité linéaire entre K_r et C_p ne semble pas être respectée ici, tout comme celle entre K_r et D_H . Notons que la présence de particules fines dans l'échantillon MNOgros (section 4.1.1) entraîne probablement une mesure de la valeur de K_r expérimentale anormalement élevée. Les divers échantillons ont des propriétés variables pour certains paramètres physico-chimiques (n , D_H , C_p) au sein d'une même série. L'annexe K présente une analyse de ces résultats à partir des valeurs de K_r normalisées afin de tenir compte de l'influence des autres paramètres. Les écarts observés pourraient être liés à la disponibilité réelle de la pyrite; le modèle de Collin considère un pourcentage de pyrite basé sur une surface spécifique totalement disponible, ce qui n'est peut-être pas le cas en pratique.

5.2 Ajustement de la valeur de la réactivité intrinsèque K'

Comme nous l'avons vu dans les sections précédentes, les valeurs prédites du taux de réaction K_r sont souvent éloignées des valeurs obtenues des mesures expérimentales, tant pour les essais menés dans ce projet que pour les essais réalisés par Martin (2005), Gosselin (2007), Ouangrawa (2007) et Pabst (2011). Une des raisons pouvant expliquer cette différence est l'incertitude qui existe pour l'estimation de la valeur de D_H , qui est obtenue ici à partir d'expressions basées sur la courbe granulométrique. Des mesures directes de la surface spécifique pourraient permettre de réduire cette incertitude. Une autre raison est la valeur prédéfinie de la réactivité intrinsèque du résidu K' , adoptée par Collin (1987), qui correspondrait à celle de la pyrite pure ($K' = 0.015 \text{ m}^3 \text{ O}_2 \cdot \text{m}^{-2} \text{ pyrite} \cdot \text{an}^{-1}$). Cependant, les types (structure cristallographique) de pyrite peuvent être variables (p. ex. cubique ou framboïdales), et l'état des surfaces peut aussi varier. Par exemple, les résidus ayant subi des traitements mécaniques et chimiques peuvent montrer des caractéristiques géochimiques assez différentes de celle d'un grain de pyrite pur. Nous avons donc revu les résultats expérimentaux afin de réaliser une nouvelle estimation de la valeur de la réactivité intrinsèque K' . Pour cela, nous nous servons des coefficients du taux de réaction déterminés expérimentalement (voir tableaux 4.18 à 4.23, section 4.5), de la formule de Collin (1987) (équ. 2.51) et de la formule du D_H définie par Aubertin et al. (1998) (équ. 2.50) pour en extraire une valeur de K' (en $\text{m}^3 \text{ O}_2 \cdot \text{m}^{-2} \text{ pyrite} \cdot \text{an}^{-1}$). La formule correspondante devient alors :

$$K' = \frac{K_r * D_H}{6 * C_p(1 - n)} \quad (5.1)$$

5.2.1 Résultats pour les résidus MNO et MO

Le tableau 5.5 présente les résultats des valeurs de K' calculées à partir de l'équation 5.1, en fonction des valeurs de K_r obtenues expérimentalement pour l'ensemble des essais. Nous avons calculé également une valeur moyenne de K' par série d'échantillons (tableau 5.5). Les valeurs moyennes de K' varient de 0.0026 à 0.0108 $\text{m}^3 \text{O}_2 \cdot \text{m}^{-2} \text{pyrite} \cdot \text{an}^{-1}$, soit entre environ 1/6 et 2/3 de la valeur de référence utilisée par Collin (1987) ($0.015 \text{ m}^3 \text{O}_2 \cdot \text{m}^{-2} \text{pyrite} \cdot \text{an}^{-1}$).

Tableau 5.5 : Valeurs de la réactivité intrinsèque K' calculée à partir de l'équation 5.1 pour chaque échantillon et valeur moyenne de K' par série d'échantillons.

Échantillons		K' (individuelle) ($\text{m}^3 \text{O}_2 \cdot \text{m}^{-2} \text{pyrite} \cdot \text{an}^{-1}$)	K' (moyenne) par série d'échantillons ($\text{m}^3 \text{O}_2 \cdot \text{m}^{-2} \text{pyrite} \cdot \text{an}^{-1}$)
Série 5, résidu MNO	MNO	0,0047	0.0026
	MNO Juin	0,0047	
	MNO sat2	0,0005	
	MNO sat3	0,0004	
Série 1	MNO28	0,0101	0.0085
	MNO50	0,0092	
	MNO75	0,0061	
Série 2	MNOfin	0,0033	0.0108
	MNOmoy	0,0061	
	MNOgros	0,0228	
Série 3	MNOfin égalisé	0,0039	0.0027
	MNOmoy égalisé	0,0014	
Série 4	MNOfin Gxfin	0,0059	0.0075
	MNOfin Gxmoy	0,0110	
	MNOfin GxGros	0,0055	
Série 5, résidu MO	MO	0,0037	0.0081
	MO sat	0,0060	
	MO sat2	0,0149	
	MO sat3	0,0078	

La figure 5.8 présente les valeurs de K' individuelles et celle adoptée par Collin (1987). On représente également les valeurs moyennes de K' par série d'échantillons. La valeur adoptée par Collin est toujours plus élevée, excepté pour l'échantillon MNOgros. Pour rappel (voir section 4.1.1), l'échantillon MNOgros comprend des particules très fines ($< 45 \mu\text{m}$) qui se sont probablement agglomérées sur les particules grossières, augmentant artificiellement sa valeur de K_r déduite des mesurés (en raison d'une plus grande surface spécifique; e.g. Nicholson, 1994).

Les résultats des valeurs prédites du coefficient du taux de réaction K_r selon le modèle de Collin (1987) et à partir des valeurs moyennes de K' par série d'échantillons sont présentés au tableau 5.6. La figure 5.9 illustre ces résultats. Notons que malgré une amélioration de la prédiction avec les nouvelles valeurs de K' , trois valeurs de K_r prédites restent encore élevées comparativement aux valeurs mesurées expérimentalement. Il s'agit des valeurs correspondant aux échantillons MNO sat2, MNO sat3 et MNOfin. Les essais de consommation de l'oxygène effectués sur les échantillons MNO sat2 et MNO sat3 (figure 4.27) ont présenté des baisses de concentration en oxygène particulièrement lentes, ce qui engendre une durée d'essai plus longue et peut mener à des imprécisions quant à la mesure de K_r .

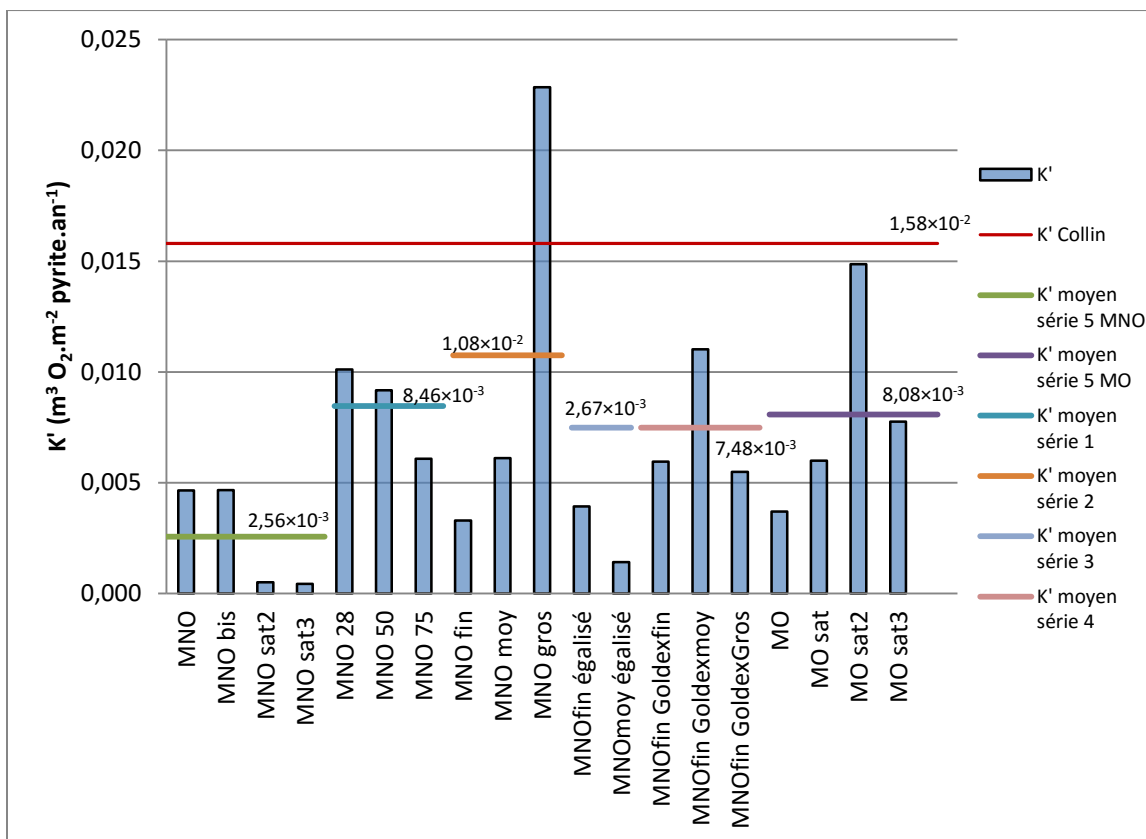


Figure 5.8 : Valeurs individuelles (batonnets) et moyennes (traits horizontaux) de K' obtenues selon l'équation 5.1 pour l'ensemble des échantillons testés ; on montre aussi la valeur de K' adoptée par Collin (1987) (voir tableau 5.5)

Tableau 5.6 : Valeurs de la réactivité intrinsèque moyenne K' ($\text{m}^3 \text{O}_2 \cdot \text{m}^{-2} \text{pyrite} \cdot \text{an}^{-1}$) par série d'échantillons et valeurs des coefficients du taux de réaction K_r prédites de ces valeurs ; On montre également les valeurs de K_r prédites selon le modèle de Collin (avec $K' = 0,015 \text{ m}^3 \text{O}_2 \cdot \text{m}^{-2} \text{pyrite} \cdot \text{an}^{-1}$) et mesurées expérimentalement.

Échantillons		K' (moyenne) par série d'échantillons ($\text{m}^3 \text{O}_2 \cdot \text{m}^{-2}$ $\text{pyrite} \cdot \text{an}^{-1}$)	K_r prédit selon Collin avec $K'=0.015$ (/an)	K_r prédit selon Collin avec valeur moyenne de K' (/an)	K_r expérimental ajusté avec POLLUTE (/an)
Série 5, résidu MNO	MNO	0.0026	1314	213	387
	MNO bis		1079	175	319
	MNO saturé2		1032	167	32
	MNO saturé3		1032	167	28
Série 1	MNO28	0.0085	275	147	170
	MNO50		493	264	281
	MNO75		778	416	307
Série 2	MNOfin	0.0108	1434	976	298
	MNOmoy		180	122	69
	MNOgros		91	62	132
Série 3	MNOfin égalisé	0.0027	1083	183	269
	MNOmoy égalisé		124	21	11
Série 4	MNOfin Gxfin	0.0075	685	325	258
	MNOfin Gxmoy		380	180	265
	MNOfin GxGros		250	118	86
Série 5, résidu MO	MO	0.0081	18	9	4
	MO saturé		17	9	6
	MO saturé2		15	8	15
	MO saturé3		15	8	8

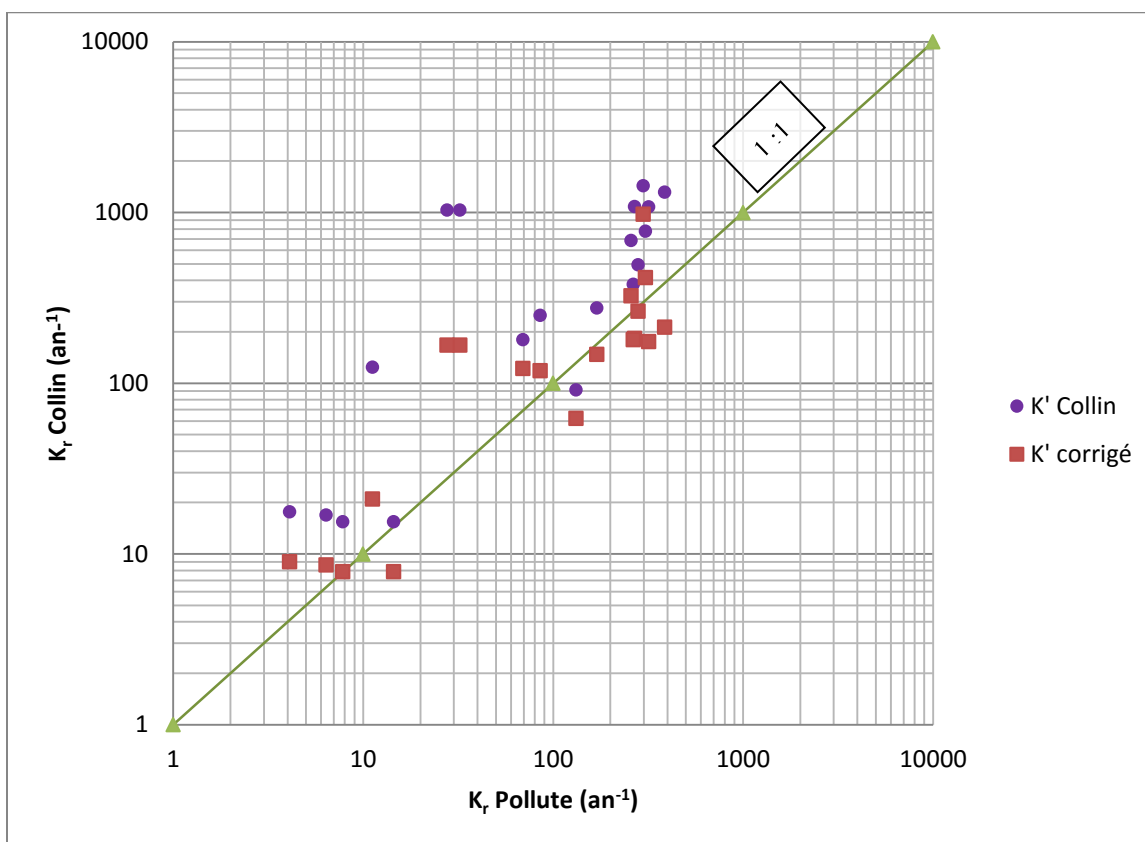


Figure 5.9 : Valeurs du coefficient du taux de réaction K_r prédites en fonction du taux de réaction K_r obtenues expérimentalement pour les résidus et mélanges ; on montre les valeurs de K_r prédites selon le modèle de Collin avec la valeur K' de référence et celles avec la valeur moyenne de K' par série d'échantillons (voir tableau 5.6)

5.2.2 Résultats d'autres essais

Des corrections sur les valeurs prédites du coefficient du taux de réaction K_r ont aussi été réalisées sur les résultats des essais de Martin (2005), Gosselin (2007), Ouangrawa (2007) et Pabst (2011) (présentés à l'annexe L). Le tableau 5.7 résume ces valeurs de K' obtenues à partir de l'équation 5.1. La figure 5.10 présente les valeurs de K' calculées et celle utilisée par Collin (1987). Certaines valeurs de K' sont ici au-dessus de celle fixée par Collin (1987) (i.e. : échantillons SNO1 et Buly8).

Tableau 5.7 : Valeurs de la réactivité intrinsèque K' calculée à partir de l'équation 5.1 pour chaque échantillon et valeur moyenne de K' par série d'échantillons, selon les résultats expérimentaux de Martin (2005), Gosselin (2007), Ouangrawa (2007) et Pabst (2011).

Échantillons	K' individuelle ($\text{m}^3 \text{O}_2 \cdot \text{m}^{-2} \text{pyrite} \cdot \text{an}^{-1}$)	K' moyen par série d'échantillons ($\text{m}^3 \text{O}_2 \cdot \text{m}^{-2} \text{pyrite} \cdot \text{an}^{-1}$)
Buly 1	0,0073	0,0072
Buly 2	0,0008	
Buly 3	0,0029	
Buly 6	0,0012	
Buly 7	0,0012	
Buly 8	0,0249	
Buly 9	0,0133	
Buly 10	0,0234	
Buly 11	0,0011	
Buly 12	0,0030	
Buly 13	0,0004	
Louvicourt S3-1	0,0010	0,0137
Louvicourt S3-2	0,0143	
Louvicourt S3-3	0,0261	
Louvicourt S3-4	0,0258	
Louvicourt S3-5	0,0248	
Louvicourt S3-6	0,0051	
Louvicourt S3-7	0,0174	
Louvicourt S3-8	0,0031	
Louvicourt S3-9	0,0053	
MNO3	0,0080	0,0082
MNO5	0,0066	
MNO12	0,0100	
MO1	0,0223	0,0208
MO2	0,0192	
SNO1	0,0474	0,0972
SNO3	0,0218	
SNO4	0,0176	
SNO5	0,3019	
SO1	0,0160	0,0101
SO2	0,0045	
SO3	0,0156	
SO4	0,0022	
SO5	0,0120	

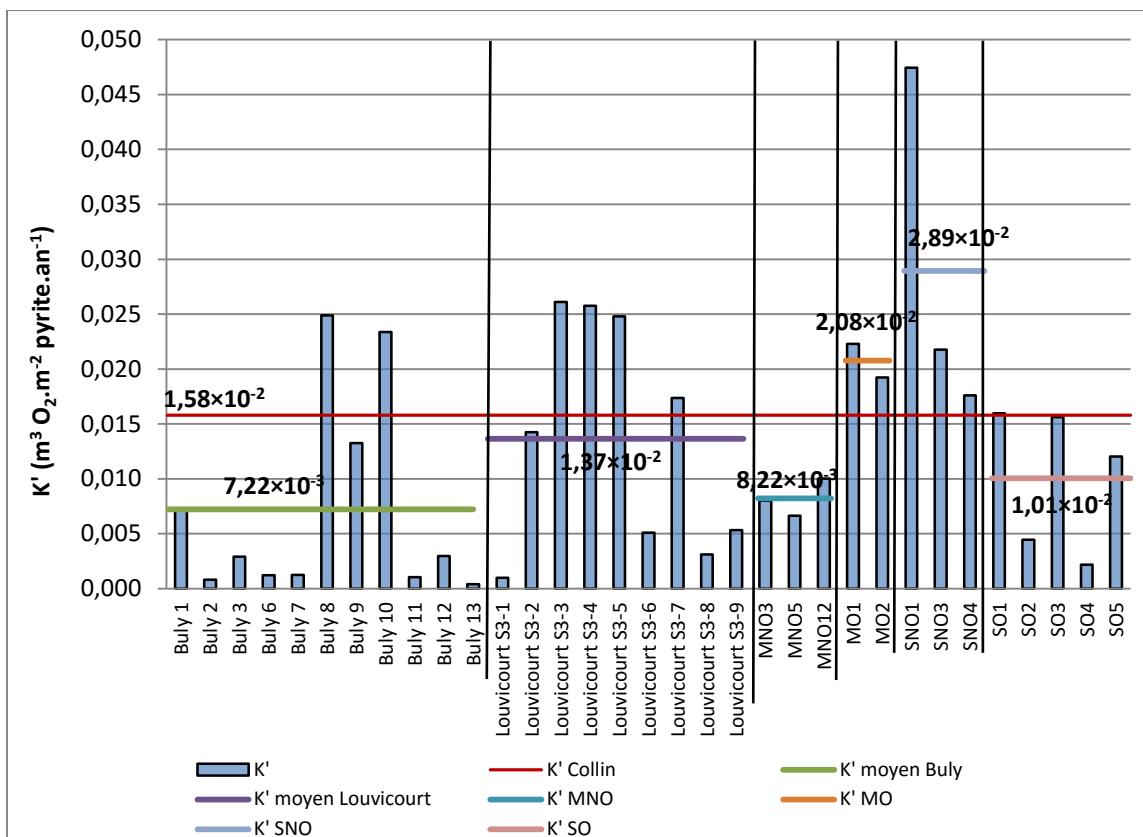


Figure 5.10 : Valeurs individuelles (batonnets) et moyennes (traits horizontaux) de K' obtenues selon l'équation 5.1 pour les essais réalisés par Martin (2005), Gosselin (2007), Ouangrawa (2007) et Pabst (2011) ; on montre aussi la valeur de K' ($0.015 \text{ m}^3 \text{ O}_2.\text{m}^{-2} \text{ pyrite}.\text{an}^{-1}$) adoptée par Collin (1987) (voir détails au tableau 5.7).

Le tableau 5.8 présente les valeurs de K_r prédites avec le modèle de Collin (1987) pour $K' = 0.015 \text{ m}^3 \text{ O}_2.\text{m}^{-2} \text{ pyrite}.\text{an}^{-1}$ et celles déterminées à partir de la valeur de réactivité intrinsèque moyenne de chaque résidu évaluée selon l'équation 5.1.

Nous avons illustré ces résultats aux figures 5.11 et 5.12, afin de mettre en évidence l'effet du degré de saturation sur ces résultats. La figure 5.11 illustre la comparaison entre les résultats des K_r prédits et mesurés avant et après la correction de la valeur de K' (moyenne pour chaque résidu) dans le modèle prédictif. On voit bien que cette correction mène à de meilleures estimations à partir du modèle de Collin. Certains écarts entre l'estimation et la mesure restent toutefois assez élevés, surtout lorsque le degré de saturation est élevé; pour illustrer cet aspect, la figure 5.12 reprend les résultats de la figure 5.11 mais en excluant les mesures pour des échantillons dont la valeur du degré de saturation était supérieure à 85%.

Tableau 5.8 : Valeurs de la réactivité intrinsèque K' moyen et des corrections des valeurs du modèle de Collin pour les essais réalisés par Martin (2005), Gosselin (2007), Ouangrawa (2007) et Pabst (2011)

Échantillons	K' moyen ($\text{m}^3 \text{O}_2 \cdot \text{m}^{-2} \text{pyrite} \cdot \text{an}^{-1}$)	K_r prédit selon Collin avec $K'=0.015$ (/an)	K_r prédit selon Collin avec valeur moyenne de K' (/an)	K_r expérimental ajusté avec POLLUTE (/an)
Buly 1	0,0072	1341	877	617
Buly 2		894	584	46
Buly 3		1076	704	177
Buly 6		944	617	78
Buly 7		993	649	77
Buly 8		861	563	1250
Buly 9		828	541	695
Buly 10		828	541	1170
Buly 11		960	628	67
Buly 12		431	281	71
Buly 13		960	628	26
Louvicourt S3-1	0,0137	2891	2540	182
Louvicourt S3-2		2960	2600	2670
Louvicourt S3-3		2891	2540	4780
Louvicourt S3-4		2960	2600	4830
Louvicourt S3-5		3442	3024	5400
Louvicourt S3-6		3992	3507	1480
Louvicourt S3-7		3855	3386	4230
Louvicourt S3-8		4268	3749	843
Louvicourt S3-9		4199	3689	1740
MNO3	0,0082	499	260	251
MNO5		298	155	122
MNO12		490	255	311
MO1	0,0208	18	24	26
MO2		20	26	24
SNO1	0,0972	77	475	231
SNO3		80	490	110
SNO4		82	505	92
SNO5		82	505	1570
SO1	0,0101	199	127	202
SO2		259	165	73
SO3		239	152	236
SO4		263	168	37
SO5		239	152	182

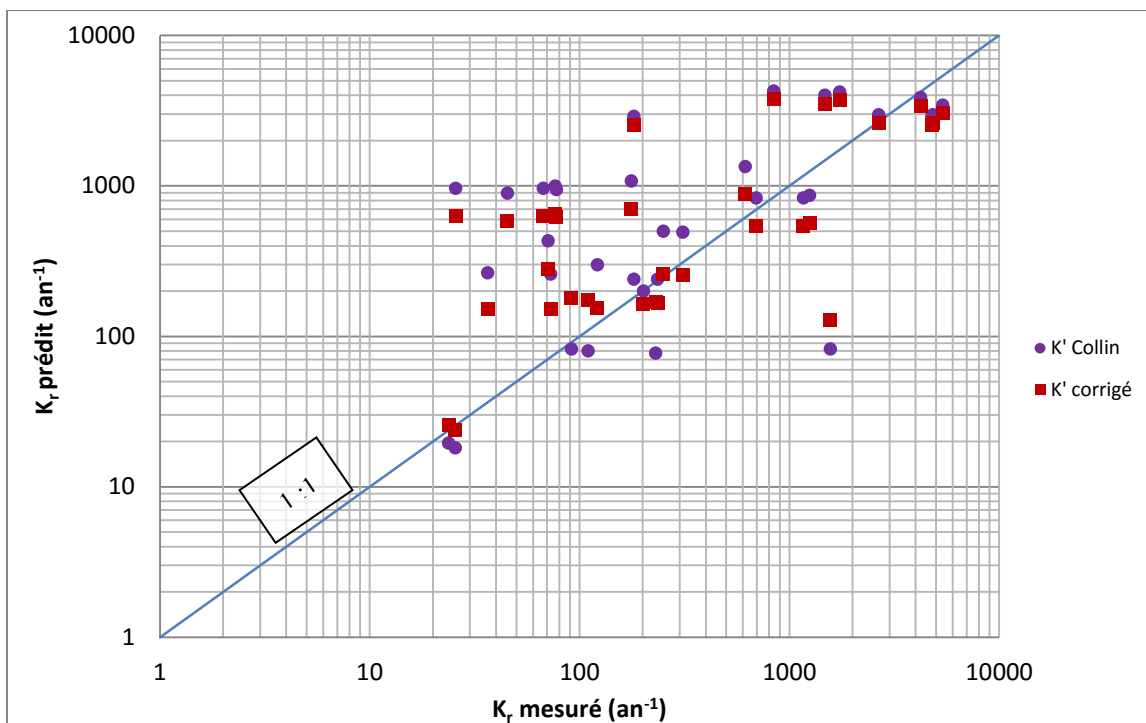


Figure 5.11 : Valeurs du coefficient du taux de réaction K_r prédites en fonction du taux de réaction K_r obtenu expérimentalement pour les essais réalisés par Martin (2005), Gosselin (2007), Ouangrawa (2007) et Pabst (2011) ; on montre les valeurs de K_r prédites selon le modèle de Collin avec la valeur K' de référence et celles avec la valeur moyenne de K' par série d'échantillons (voir tableau 5.8)

On constate sur la figure 5.12 que la correction proposée (par ajustement de la valeur de K') mène à de meilleures estimations de K_r à partir du modèle de Collin (1987). Un échantillon montre un écart plus grand que les autres entre la prédiction et la mesure de K_r , soit un échantillon du résidu Louvicourt (S3-1) dont la valeur du degré de saturation $S_r = 1\%$. Le degré de saturation, et l'incertitude associée suite aux mesures expérimentales, pourrait donc avoir un effet important sur la prédiction et la mesure de K_r .

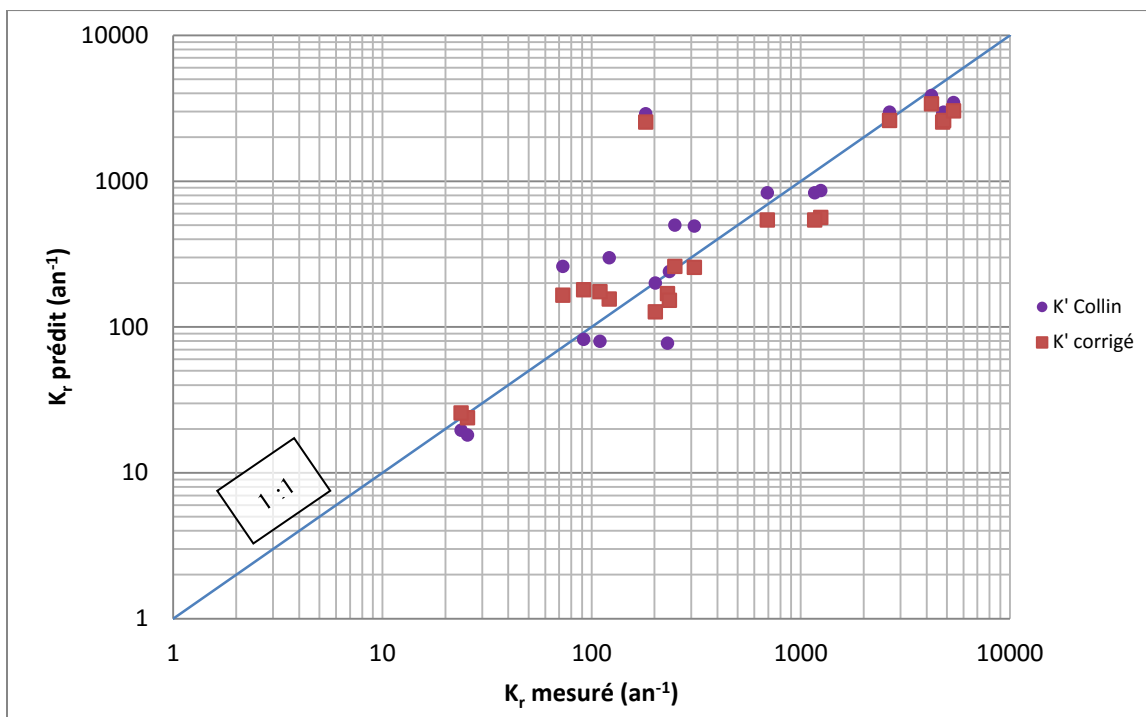


Figure 5.12 : Valeurs prédites du coefficient du taux de réaction K_r en fonction du taux de réaction K_r obtenue expérimentalement pour les essais réalisés par Martin (2005), Gosselin (2007), Ouangrawa (2007) et Pabst (2011) ; on montre les valeurs de K_r prédites selon le modèle de Collin 1987) avec la valeur K' de référence et celles avec la valeur moyenne de K' par série d'échantillons. Les résultats obtenus sur échantillons présentant une valeur de $S_r > 85\%$ ne sont pas inclus ici (voir tableau 5.8).

5.3 Évolution de la réactivité dans le temps

Les essais de caractérisation menés après les essais de consommation de l'oxygène avaient notamment pour objectif d'évaluer l'évolution des caractéristiques liées à la présence de pyrite, soit la teneur en soufre (%S), la teneur en pyrite (C_p) et la densité relative des grains solides D_r . Cette section revoit d'abord les principaux résultats et l'incertitude de mesures, et évalue les valeurs obtenues avant et après les essais de consommation. Une relation simple entre la valeur de D_r et la teneur en pyrite est proposée, et une méthode pour estimer la perte en pyrite est suggérée.

5.3.1 Principaux résultats et incertitudes

Les valeurs des caractéristiques précitées ont été définies avant et après les essais de consommation d'oxygène. L'objectif était d'évaluer s'il y a eu un changement significatif pour ces paramètres ciblés. Nous présentons les résultats de mesure avant et après les essais de consommation d'oxygène avec les bornes inférieures et supérieures pour la caractérisation menée à la fournaise LECO et au DRX (voir sections 4.3.1 et 4.3.2); on présente aussi les valeurs mesurées et la plage d'incertitude pour la densité relative des grains D_r définie selon la norme ASTM D854-14 (section 3.3.1)

Teneur en soufre

Le tableau 5.9 présente les valeurs de teneur en soufre déterminées à la fournaise LECO avant et après les essais de consommation de l'oxygène. Les analyses étaient faites sur trois répliques, à partir desquels on peut établir les bornes inférieure et supérieure (selon les valeurs mesurées directement).

Les résultats montrent que les valeurs moyennes de la teneur en soufre diminuent généralement après les essais de consommation. Trois échantillons (sur huit) présentent une augmentation de cette valeur après les essais; il s'agit des résidus MNO, Gx et MNO28, qui montrent une plage d'imprécision relativement élevée. Par exemple, l'écart de 1,5% pour le résidu MNO représente une erreur relative de 13% environ. Notons toutefois que l'incertitude associée à la plage des mesures à la fournaise LECO est relativement élevée, ce qui pourrait expliquer une telle observation.

La figure 5.13 illustre graphiquement ces résultats avec les plages d'imprécision. Ceux-ci indiquent qu'il n'y a pas de tendance claire, qui pourrait indiquer une diminution de la teneur en soufre après les essais de consommation de l'oxygène. Lorsque l'on tient compte de l'incertitude des mesures au LECO, seulement deux échantillons (sur 8) semblent montrer une baisse de teneur en soufre, i.e. MNO_{moy} et MNO_{fin}. Ce sont les seuls cas où les plages de mesures avant et après essai ne se chevauchent pas. Cette absence de tendance n'est pas incohérente car même si la pyrite s'oxyde, le soufre ne disparaît pas ; il peut se trouver sous d'autres formes, liées aux réactions d'oxydation, qui sont aussi détectées par les mesures au LECO (qui ne fait pas cette distinction). La teneur en soufre ne semble donc pas être un indicateur approprié pour interpréter l'évolution des caractéristiques géochimiques (minéralogiques) des résidus dans le temps.

Tableau 5.9 : Valeurs de teneur en soufre %S obtenues à la fournaise LECO avant et après les essais de consommation de l'oxygène, avec les plages de mesures.

	Teneur en soufre (%)					
	avant essai			après essai		
	Moyenne avant essai	Min	Max	Moyenne après essai	Min	Max
MNO	10,98	9,65	12,10	11,67	10,40	13,40
Gx	0,20	0,19	0,21	0,21	0,21	0,21
MNO28	2,69	2,52	2,85	3,40	2,78	3,88
MNO50	5,97	5,59	6,53	5,54	4,88	6,64
MNO73	9,17	8,55	9,73	8,31	7,85	9,04
MNOfin	14,40	14,10	14,70	13,07	12,20	13,90
MNOmoy	12,20	12,10	12,30	9,60	8,31	10,30
MNOfin égalisé	7,09	6,56	8,79	7,80	7,50	8,04

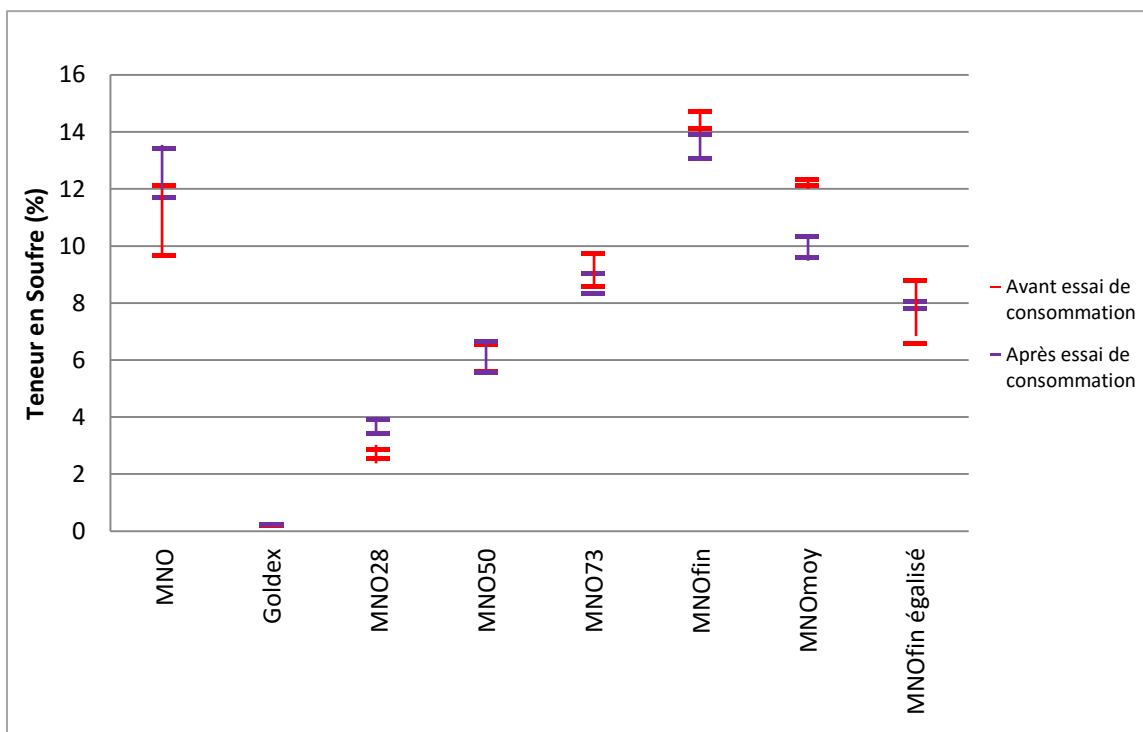


Figure 5.13 : Teneurs en soufre obtenues à la fournaise LECO avant et après les essais de consommation d'oxygène, avec les plages d'incertitude autour des valeurs moyennes (voir tableau 5.9)

Teneur en pyrite

Le tableau 5.10 présente les valeurs de teneur en pyrite C_p obtenues par analyses au DRX, avant et après les essais de consommation de l'oxygène. Les analyses étaient faites sur des répliques (nombre variant selon échantillon, voir tableau 4.15). On peut donc ainsi établir les bornes inférieure et supérieure selon les valeurs mesurées directement.

On observe que les valeurs moyennes de C_p montrent une baisse après les essais de consommation d'oxygène, excepté pour l'échantillon MNOfin dont la valeur reste identique (18,6 %).

La figure 5.14 illustre graphiquement ces résultats et la plage de ces mesures. Lorsque la plage des valeurs mesurées est prise en compte, on constate que trois des cinq échantillons montrent une baisse : MNO28, MNO50 et MNO73. Pour les autres résidus, on peut noter que l'écart entre les valeurs moyennes et les bornes de la plage de mesure est très variable; elle peut varier de +/- 0.04% pour MNO28 post consommation à +/-2,8% pour MNOmoy post consommation (qui a une teneur en pyrite moyenne de 6,96%). Un écart de 2,8% pour une valeur moyenne de 6,96% représente une imprécision relative de 40% environ.

Les résultats basés sur les valeurs moyennes suggèrent néanmoins que la teneur en pyrite (déterminée au DRX) constitue un indicateur de l'évolution des caractéristiques de ces résidus dans le temps (avant et après les essais de consommation). Cependant, les incertitudes liées à ces mesures ainsi qu'à l'hétérogénéité des petits échantillons testés suggèrent que la teneur en pyrite C_p devrait être mesurée sur de nombreux répliques.

Tableau 5.10 : Valeurs de teneur en pyrite C_p obtenues au DRX avant et après les essais de consommation de l'oxygène avec la plage des mesures pour les échantillons de résidus testés.

	Teneur en pyrite C_p (%)					
	avant essai			après essai		
	Moyenne avant essai	Valeur Minimale mesurée	Valeur Maximale mesurée	Moyenne après essai	Valeur Minimale mesurée	Valeur Maximale mesurée
MNO28	5,5	4,98	6,02	4,09	4,05	4,12
MNO50	9,21	8,32	10,09	6,37	6,24	6,49
MNO73	14,04	12,87	15,2	10,96	10,9	11,02
MNOfin	18,61	17,67	19,54	18,6		
MNOmoy	14,27			6,96	4,11	9,8

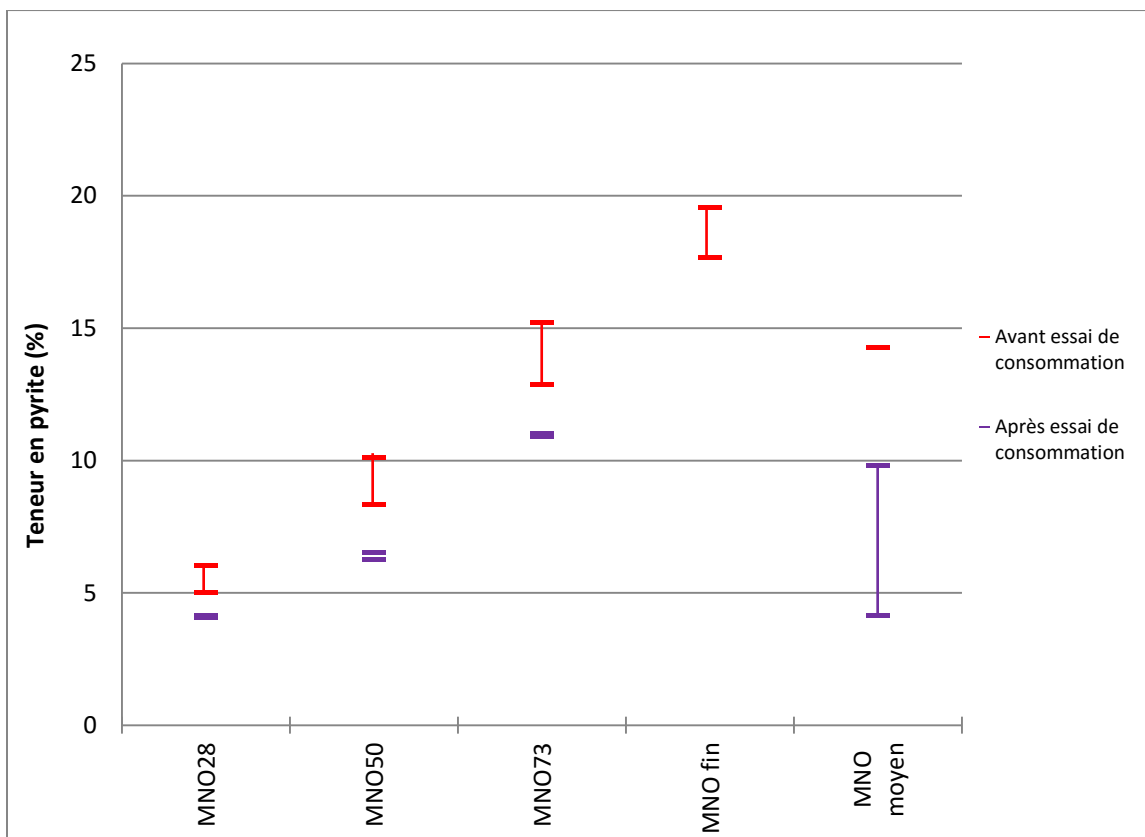


Figure 5.14 : Teneurs en pyrite C_p obtenues au DRX avant et après les essais de consommation d'oxygène, avec les valeurs moyennes et les valeurs extrêmes mesurées (voir tableau 5.10)

Densité relative des grains

Le tableau 5.11 présente les valeurs la densité relative des grains solides D_r avant et après les essais de consommation de l'oxygène. Chaque mesure est faite en triplicata. Nous obtenons donc une valeur moyenne de D_r ainsi que des bornes déduites directement des valeurs mesurées. L'écart de ces valeurs mesurées pour un même matériau est fixée par la norme ASTM D854-14 à 0,02 (section 3.3.1). L'écart le plus élevé entre la valeur moyenne de D_r et les bornes de la plage de mesures est de 0,029 (échantillon MNOmoy avant essai de consommation). La valeur moyenne de D_r pour cet échantillon est de 3,092. Un écart de $\pm 0,029$ pour une valeur moyenne de 3,092 représente une imprécision relative de 1% environ.

On observe que, comme pour la teneur en pyrite C_p , les valeurs moyennes de D_r montrent une baisse après les essais de consommation d'oxygène, excepté pour l'échantillon MNOfin dont la valeur reste stable.

Tableau 5.11 : Valeurs de la densité relative des grains solides D_r avant et après les essais de consommation de l'oxygène, avec la plage des valeurs mesurées sur les échantillons de résidus testés.

	Densité relative des grains solides D_r			
	avant essai de consommation de l'oxygène (Poly)			après essai de consommation de l'oxygène (UQAT)
	Valeur moyenne	Bornes minimale et maximale des mesures		Valeur moyenne (1 seule mesure, pas de bornes de mesures)
MNO28	2,875	2,854	2,903	2,805
MNO50	2,907	2,900	2,913	2,860
MNO73	3,003	2,990	3,029	2,899
MNOfin	3,134	3,127	3,142	3,132
MNOmoy	3,092	3,064	3,122	2,877
MNOfin égalisé	2,983	2,962	3,007	2,946

La figure 5.15 illustre graphiquement ces résultats. On remarque que la majorité des échantillons (5 sur 6) montre une valeur de D_r plus faible après les essais d'oxydation (excepté pour MNOfin avec $D_r = 3,14$ avant et après les essais), même en tenant compte de la plage de variation des mesures. D'après ces observations, on peut déduire que la densité relative des grains solides D_r serait un bon indicateur. La densité relative représente ainsi le paramètre présentant le plus d'intérêt pour statuer sur l'évolution des caractéristiques géochimiques (minéralogiques) des résidus soumis aux essais d'oxydation, notamment en raison de la précision de la mesure et parce que cette valeur de D_r est relativement facile à déterminer expérimentalement.

Une façon simple de relier la valeur de D_r à l'évolution de la teneur en pyrite au sein d'un résidu minier réactif est proposée dans ce qui suit.

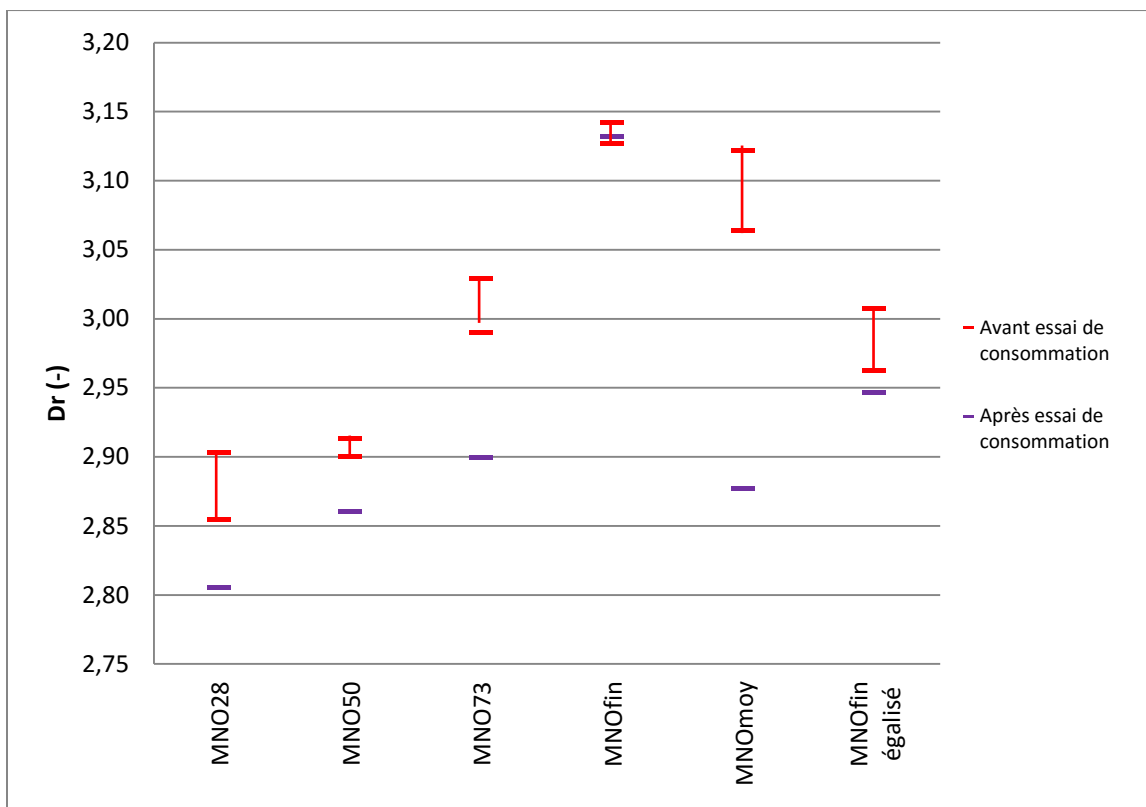


Figure 5.15 : Densités relative des grains solides D_r avant et après les essais de consommation d'oxygène, avec les valeurs moyennes et la plage d'incertitude associée.

5.3.2 Lien entre densité relative D_r et teneur en pyrite C_p

Les figures 5.16 et 5.17 présentent les valeurs de teneur en soufre %S, de teneur en pyrite C_p et de densité relative des grains solides D_r pour chaque échantillon avant les essais de consommation d'oxygène. Sur la figure 5.16, on représente la droite théorique reliant C_p et %S lorsque l'on suppose que la totalité du soufre provient de la pyrite. Cette droite est donnée par l'équation :

$$C_p = \frac{1}{2} \%S \frac{M_{py}}{M_S} \quad (5.2)$$

Avec M_{py} et M_S les masses molaires de la pyrite et du soufre respectivement (g.mol^{-1})

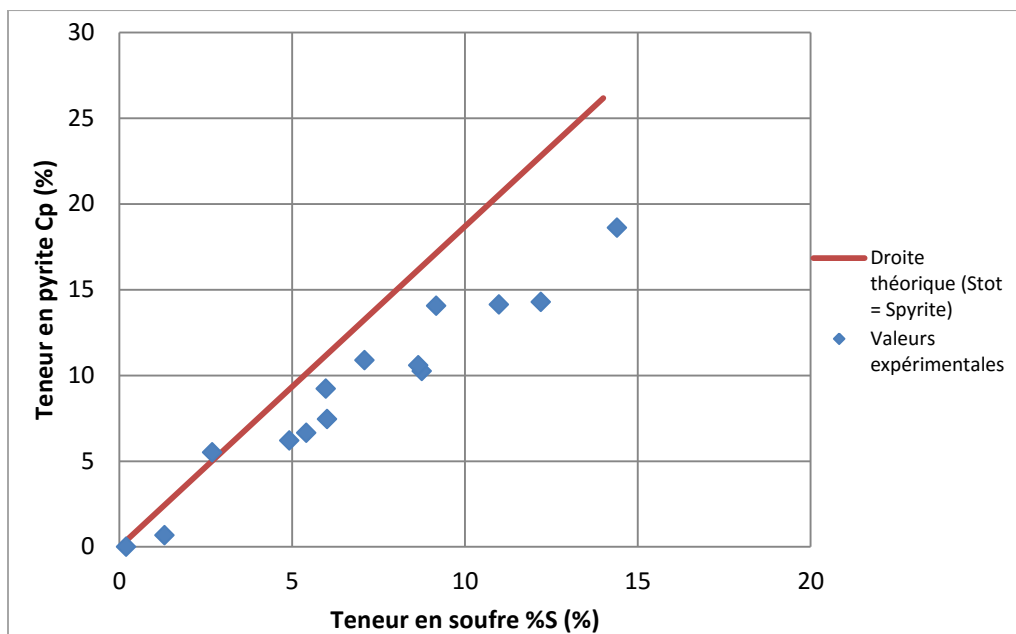


Figure 5.16 : Relation entre la teneur en pyrite C_p et la teneur en soufre %S avant les essais de consommation d'oxygène; on montre aussi la droite théorique lorsque l'on suppose que la totalité du soufre provient de la pyrite (équ. 5.2 ; données tirées des tableaux 4.9 et 4.15)

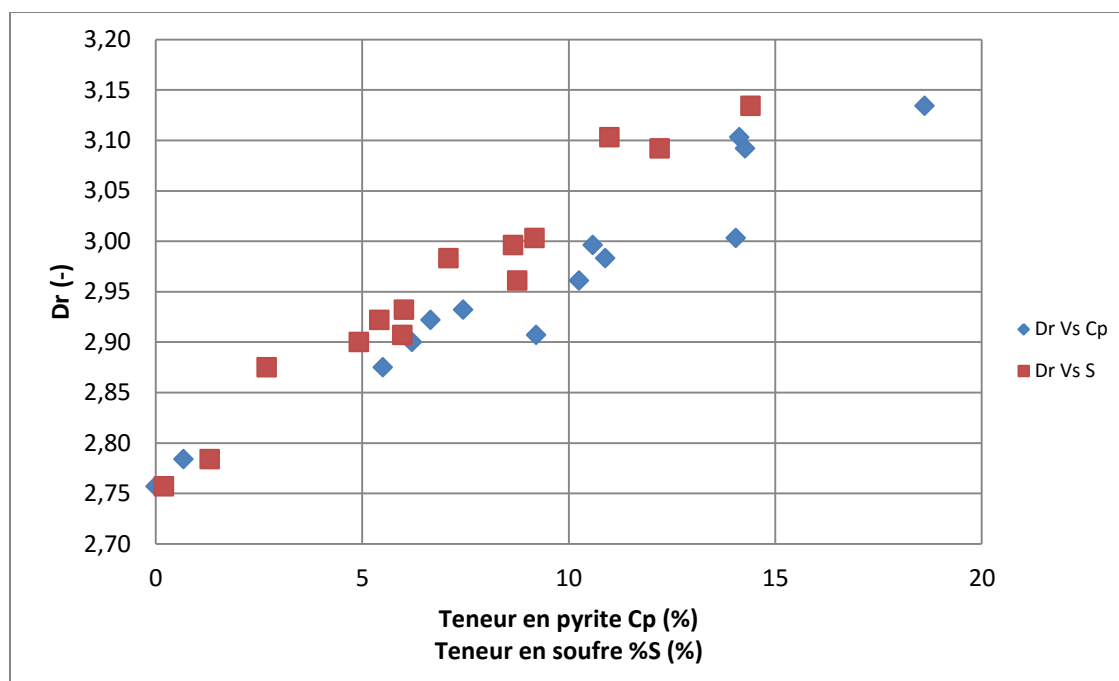


Figure 5.17 : Densité relative des grains solides D_r en fonction de la teneur en soufre (%S) et de la teneur en pyrite C_p avant les essais de consommation d'oxygène (selon les données tirées des tableaux 4.3, 4.9 et 4.15)

Ces graphiques montrent une cohérence entre ces paramètres. Ainsi, plus la valeur de D_r est élevée, plus la teneur en soufre %S et la teneur en pyrite C_p sont élevées. Le D_r étant le reflet de la densité de l'ensemble des grains d'un résidu, une diminution de D_r représente une perte de masse relative (i.e. baisse du soufre et de la pyrite). On remarque sur la figure 5.16 que la quantité de soufre n'est pas linéairement reliée à la pyrite. Ceci indique que l'on ne peut pas déduire la teneur en pyrite en se basant uniquement sur la teneur en soufre (i.e. équation 5.2).

La pyrite est un minéral de densité élevée ($D_r = 4,95$ à $5,10$, comparée à environ $2,7$ pour la majorité des grains de sol naturel). La baisse de la teneur en pyrite peut entraîner une variation de la densité d'un échantillon, et donc de D_r . Si l'on émet l'hypothèse que l'ensemble des autres grains ont un D_r de $2,7$ (sauf ceux de pyrite), on peut établir une relation entre C_p (en %) et D_r , qui peut s'exprimer comme suit (une valeur de $D_r = 5$ est utilisée ici pour la pyrite) :

$$D_r = (100 - C_p) * 2.7 + C_p * 5 \quad (5.3)$$

En réorganisant l'équation 5.3, on obtient :

$$C_p = \frac{D_r - 2.7}{(5 - 2.7)} \quad (5.4)$$

avec C_p exprimée en %. Cette équation a été appliquée aux résultats expérimentaux présentés ici et à ceux d'essais antérieurs menés par Monzon (1998), Martin (2005), Gosselin (2007), Ouangrawa (2007) et Pabst (2011). Le tableau 5.12 présente ces résidus avec les résultats utilisés pour les analyses. La figure 5.18 illustre les résultats obtenus selon l'équation 5.4. On constate que la corrélation est encourageante. Ceci suggère qu'il serait possible d'estimer la valeur de C_p des résidus sulfureux à partir de la valeur de D_r (ou vice versa).

Tableau 5.12 : Caractéristiques de divers résidus mesurées par Monzon (1998), Martin (2005), Gosselin (2007), Ouangrawa (2007) et Pabst (2011).

Auteur	échantillons	D_r (-)	C_p (-)
Monzon (1998)	Manitou 20-40	2,849	0,075
	Manitou 100-200	2,849	0,025
	Manitou >200	2,849	0,075
Gosselin (2007)	MNO	2,867	0,0706
	MO	2,779	0
	Louvicourt	3,513	0,3795
Martin (2005)	Buly	2,929	0,118
Pabst (2011)	MNO	3,136	0,1187
	MO	2,766	0,0047
	Gx	2,769	0
	SNO	2,74	0,0162
	SO	2,871	0,0403
Ouangrawa (2007)	Louvicourt	3,51	0,3795
	Sigma	2,82	0,0361
	Lou-Sig	3,02	0,1629
	Lou-Sab	2,94	0,1384

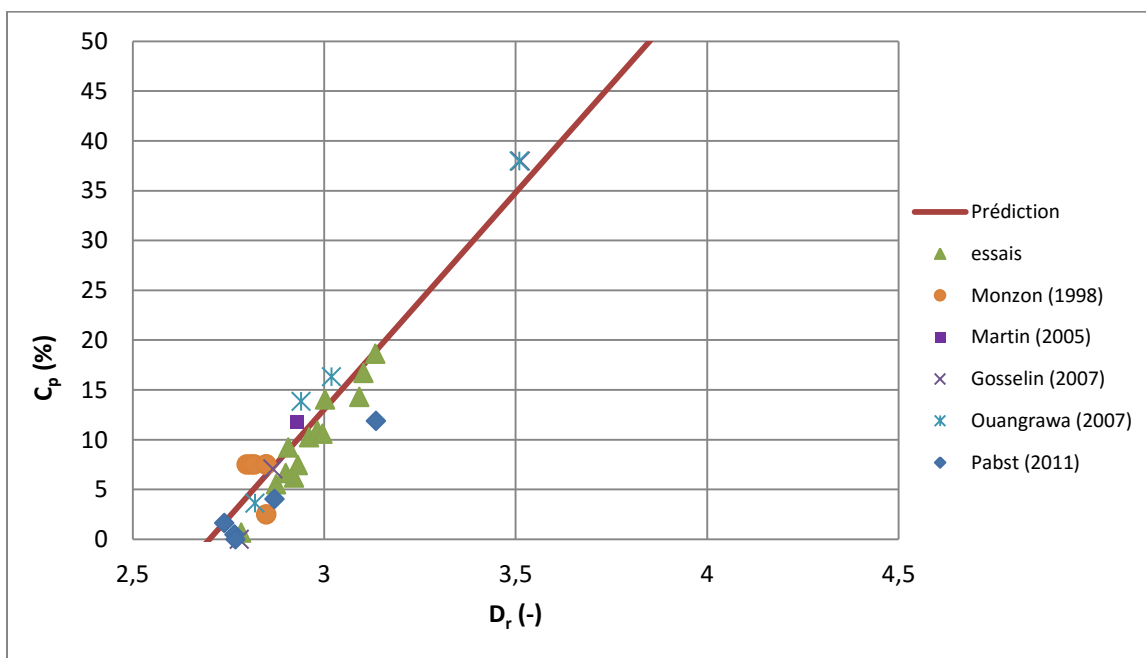


Figure 5.18 : Comparaison entre la relation prédite entre C_p et D_r (éq. 5.4), et les résultats expérimentaux incluant ceux d'essais précédents (données tirées des tableaux et 4.3, 4.15 et 5.15)

5.3.3 Évolution de la teneur en pyrite dans le temps

La teneur en pyrite C_p et la densité relative des grains solides D_r représenteraient de bons indicateurs pour statuer sur l'évolution des caractéristiques géochimiques (minéralogiques) des résidus soumis aux essais d'oxydation. Mais nous avons également vu que l'incertitude sur le paramètre C_p liée à l'hétérogénéité des échantillons testés et la mesure des analyses DRX étaient importantes. La mesure de D_r est usuellement plus précise et relativement plus facile à réaliser expérimentalement. Il serait ainsi possible d'utiliser le lien entre C_p et D_r (éq. 5.4) pour statuer sur l'évolution de la minéralogie (i.e. valeur de C_p) suite à l'oxydation de la pyrite.

À l'aide de l'équation 5.4, nous avons évalué les valeurs de teneur en pyrite C_p avant (i.e. valeur initiale C_{pi}) et après (valeur finale C_{pf}) les essais de consommation d'oxygène à partir des valeurs de densité relative D_r mesurées (D_{ri} et D_{rf}) (tableau 5.13). Nous postulons à nouveau ici que seule la perte en pyrite au cours d'un essai de consommation de l'oxygène explique la variation de la valeur de D_r . Nous utilisons ainsi les variations de ces valeurs pour établir l'évolution dans le temps. Par exemple, pour l'échantillon MNO, $C_{pi} = 0,18$ et $D_{ri} = 3,103$; $C_{pf} = 0,12$ et $D_{rf} = 2,984$. La perte de pyrite ΔC_p pour l'échantillon MNO est donc de 0,05 (tableau 5.13). Si l'on considère que cette perte de pyrite se produit seulement durant l'essai de consommation d'oxygène (d'une durée Δt), il est possible d'estimer la perte de pyrite par unité de temps $\Delta C_p / \Delta t$, ce qui permet de quantifier (approximativement) l'évolution de C_p dans le temps en phase d'oxydation.

La figure 5.19 présente les valeurs de $\Delta C_p / \Delta t$ en fonction du paramètre D_H . Cette figure indique que la perte en pyrite dans le temps, par oxydation directe, semble être liée au diamètre équivalent D_H .

Cette analyse n'est toutefois que préliminaire et cette approche devrait être approfondie. Elle fournit néanmoins une piste pour établir un lien entre le coefficient du taux de réaction utilisé dans la 2^e loi de Fick (éq.2.44) et la réactivité incluse un modèle évolutif tel celui du noyau réactif (« shrinking core », voir section 2.3.5).

Tableau 5.13 : Valeurs des densités relatives des grains solides avant et après essais de consommation D_{ri} et D_{rf} et des teneurs en pyrites C_{pi} et C_{pf} déduites de ces valeurs et de l'équation 5.4 pour les échantillons testés; on montre aussi les valeurs de perte en pyrite en fonction du temps ($\Delta C_p / \Delta t$).

	MNO	MNO28	MNO50	MNO73	MNO fin	MNO moyen	MNO fin égalisé
D_{ri}	3,103	2,875	2,907	3,003	3,134	3,092	2,983
D_{rf}	2,984	2,805	2,86	2,899	3,132	2,877	2,946
C_{pi}	0,18	0,08	0,09	0,13	0,19	0,17	0,12
C_{pf}	0,12	0,05	0,07	0,09	0,19	0,08	0,11
Perte en pyrite ΔC_p	0,05	0,03	0,02	0,05	0,00	0,09	0,02
Durée de l'essai (min) Δt	1055	1187	464	1083	15	7741	341
perte en pyrite par an ($\Delta C_p / \Delta t$) (an^{-1})	0,43	0,22	0,39	0,37	0,51	0,11	0,41

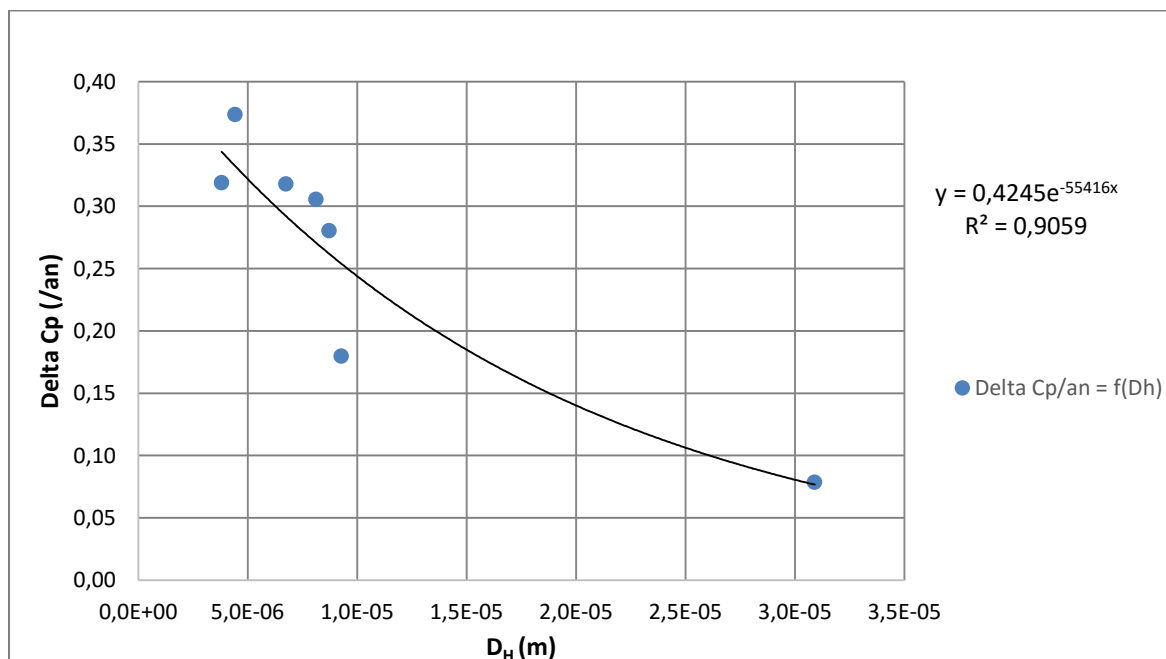


Figure 5.19 : Relation entre la perte en pyrite dans le temps $\Delta C_p / \Delta t$ (basée sur la variation de D_r) et le diamètre équivalent des grains de résidus D_H

5.4 Synthèse et dernières remarques

La première partie de ce chapitre a porté sur l'analyse des incertitudes liées aux imprécisions de mesure au cours des essais de diffusion et consommation d'oxygène. De manière générale, nous avons pu constater qu'une variation de quelques millimètres sur l'estimation de l'épaisseur de l'éprouvette pouvait mener à des incertitudes non négligeables sur les valeurs de la porosité, de la teneur en eau volumique et, surtout, du degré de saturation S_r . Les valeurs du coefficient de diffusion effectif D_e déduites de ces mesures lors des essais de consommation d'oxygène sont sensibles à cette incertitude. Les valeurs du taux de réaction K_r mesurées semblent moins sensibles à ces incertitudes, selon les analyses présentées ici pour les essais de consommation de l'oxygène. Cela est en partie lié à la nature même de ces essais de consommation de l'oxygène. Lors d'un essai à un seul réservoir comportant une éprouvette relativement mince au bas, la consommation de l'oxygène crée un gradient vers le bas. Mais la contribution de la diffusion dans le réservoir et le résidu (i.e. effet de D_e) est ici très limitée en raison de la faible distance à parcourir dans l'éprouvette; l'imprécision sur la valeur de S_r et de D_e a donc peu de répercussion sur l'ajustement par itération des courbes expérimentales et numériques, menant à la détermination de la valeur de K_r (voir aussi Gosselin, 2007).

L'analyse indique également que la différence entre les valeurs prédites et mesurées du coefficient du taux de réaction K_r ne s'expliquerait pas par les imprécisions des mesures (i.e. volume et hauteur des échantillons).

Le chapitre inclut aussi une méthode pour ajuster la valeur de la réactivité intrinsèque K' (plutôt que d'utiliser la valeur unique proposée par Collin 1987). Cet ajustement mène à une amélioration de la prédiction des valeurs de K_r pour les essais menés dans le cadre de ce projet et pour les résultats d'essais antérieurs.

La dernière partie de ce chapitre suggère une piste pour analyser l'évolution de trois paramètres (C_p , %S et D_r). Cette approche considère que la valeur de D_r est le meilleur indicateur pour évaluer les caractéristiques liées à l'évolution dans le temps. Nous avons proposé une formule simple permettant d'exprimer la teneur en pyrite C_p en fonction de la densité relative des grains solides D_r . A partir de celle-ci, il est possible d'évaluer la diminution de la teneur en pyrite dans le temps ($\Delta C_p / \Delta t$). Cette diminution semble liée à la valeur de la taille des grains (exprimée par D_H).

Plusieurs autres aspects n'ont pas été pris en compte dans cette étude, et mériteraient d'être revus plus en détails. Mentionnons par exemple :

La caractérisation des mélanges de la série 2 a mis en évidence que les bornes granulométriques visées ($< 45 \mu\text{m}$; $45 \mu\text{m} < x < 75 \mu\text{m}$; $> 75 \mu\text{m}$) n'ont pas été atteintes car les fractions grossières et moyennes comportaient une proportion relativement élevée de particules fines $< 75 \mu\text{m}$. L'agglomération de particules fines sur les particules plus grossières serait responsable de cette condition. Il aurait été possible d'utiliser un défloculant pour décoller et séparer les particules fines, avant le tamisage en condition humide. Le protocole pourrait alors s'inspirer de l'approche décrite par Nicholson (1994) qui a proposé une méthode pour éviter l'accumulation de particules fines sur les particules grossières.

Les mélanges de la série 4 auraient dû présenter théoriquement des discontinuités granulométriques. Ceci n'a pas été observé. Cela confirme que la méthode de fractionnement (tamisage par voie humide) doit être améliorée.

La surface spécifique a été évaluée par le biais de modèles basés sur la courbe granulométriques, qui ont été comparés entre eux. Il faudrait toutefois pousser plus loin cette comparaison entre ces modèles, en considérant par exemple des valeurs du coefficient de forme α allant de 6 à 10. Tel que mentionné, il pourrait être utile de mesurer la valeur de surface spécifique en laboratoire afin de comparer les résultats expérimentaux aux prédictions. Cela permettrait notamment d'ajuster la valeur du paramètre α . Les valeurs de D_H ont été calculées également sur la base de données granulométriques (i.e. D_{10} et C_U , selon les équations proposées par Aubertin et al., 1998 et Mbonimpa et al. 2002). La détermination directe de la surface spécifique pourrait mener à une meilleure estimation du D_H .

La comparaison entre les valeurs du taux de réaction K_r ajustées selon les essais de diffusion et des essais de consommation pour les échantillons de la série 1 se révèle difficile. Cela est dû à une mauvaise précision pour évaluer la taille de ces échantillons pour les essais de diffusion (manque de matériel, compaction faible). De plus, pour l'échantillon MNO73, l'essai de diffusion a été très court (15 heures), ce qui rend la détermination de K_r moins précise. Les essais de consommation sont nettement préférables pour estimer la valeur de K_r .

Par ailleurs, on a noté que l'échantillon MNOfin contenait de la sphalérite (1,8%), mais ceci n'a pas été pris en compte lors de l'interprétation car la prédiction selon le modèle de Collin (1987)

ne prend pas en compte l'influence d'autres minéraux sulfureux. Dans ce cas, la valeur de K_r prédite par ce modèle surestime fortement la valeur déduite des mesures ; cet écart pourrait être dû à l'imprécision de la valeur de D_H et de la teneur en pyrite.

La formule de Collin définit une proportionnalité entre le paramètre $(1-n)$ et la réactivité K_r des résidus réactifs. Cette relation n'a pas été analysée, nous nous sommes concentrés sur les paramètres granulométriques et minéralogiques. Il serait intéressant de vérifier l'effet de la variation de porosité n (ou d'indice des vides e) sur la valeur de la réactivité K_r et les autres hypothèses de la formule de Collin.

Une relation entre les valeurs de densité relative D_r et de teneur en pyrite C_p a été proposée. Elle est vérifiée dans le cadre de nos essais et de ceux de la littérature que nous avons étudiée. Une étude se centrant sur ce phénomène, avec une plus grande diversité de résidus pourrait être intéressante. Cela permettrait, par exemple, de vérifier l'effet d'autres minéraux à forte densité (i.e. la pyrrhotite) sur l'applicabilité de cette formule.

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

6.1 Conclusion

Une étude expérimentale a été menée sur les résidus miniers provenant des sites Goldex et Manitou. Des mélanges entre ces résidus ont aussi été préparés, afin d'obtenir des séries d'échantillons présentant une variation systématique d'un seul paramètre à la fois, sur la base des caractéristiques granulométriques, minéralogiques et hydrogéologiques. Des essais ont été menés pour évaluer la granulométrie, la densité relative des grains solides, la minéralogie, les caractéristiques de compaction, la conductivité hydraulique saturée et la courbe de rétention d'eau. Des essais de diffusion et des essais de consommation de l'oxygène ont aussi été réalisés afin d'évaluer les paramètres associés au transport de l'oxygène. Ces résultats d'essais sont interprétés à l'aide de codes numériques, sur la base des lois de Fick. Ces valeurs expérimentales ont ensuite été comparées à des valeurs prédites à partir de modèle analytique.

L'analyse des essais de consommation réalisés sur les différentes séries (mélanges de résidus) a permis d'étudier l'influence des caractéristiques granulométriques et minéralogiques sur la réactivité des résidus miniers sulfureux. On a ainsi observé que plus le diamètre équivalent D_H des résidus est grand, plus la valeur du coefficient du taux de réaction K_r est faible; ceci est lié à l'effet de la surface spécifique (qui est plus grande lorsque les grains sont plus petits). Le coefficient K_r ne semble pas être influencé par la teneur en pyrite dans la même mesure que ce qui était anticipé. Pour une augmentation du degré de saturation S_r , on observe une augmentation de K_r , jusqu'à l'atteinte d'un plateau (autour de $S_r = 20\%$), comme observé par Gosselin (2007). Cependant, l'influence des valeurs de S_r élevées sur K_r n'est pas bien mise en évidence par nos résultats. Les valeurs obtenues avec le modèle prédictif de Collin (1987) montrent une surestimation du K_r prédit. Un ajustement de la valeur de la réactivité intrinsèque K' est proposé pour améliorer la précision des valeurs prédites.

Certains essais de caractérisation ont aussi été réalisés avant et après les essais de consommation d'oxygène, afin d'évaluer s'il y a modification de certains paramètres dans le temps. Les résultats montrent que la teneur en soufre mesurée à la fournaise LECO ne varie pas de façon notable dans le temps pour ce type d'essai. La teneur en pyrite tend toutefois à diminuer pour certains des

échantillons. La valeur de D_r diminue de manière presque systématique après chaque essai. Il est possible que ce changement soit lié à une variation de la masse due au lessivage de pyrite.

L'étude comporte aussi une estimation de l'effet de l'imprécision sur l'interprétation des résultats des essais de consommation et de diffusion de l'oxygène. Cette incertitude est surtout reliée à la précision limitée des mesures du volume (hauteur) des éprouvettes soumises aux essais. L'effet de l'imprécision des mesures réalisées au montage des cellules pour les essais de diffusion et les essais de consommation de l'oxygène sur la détermination des paramètres montre que le degré de saturation S_r est le plus sensible. Cet effet est évalué et discuté dans le mémoire.

Des résultats issus d'essais menés lors de travaux précédents (antérieurs à ce mémoire) sont également repris et analysés afin de valider les résultats obtenus ici. Les résultats concordent généralement assez bien avec ceux obtenus des travaux réalisés pour ce projet.

6.2 Recommandations

Pour faire suite au présent projet, il serait utile de définir un protocole d'essai permettant de réduire l'incertitude liée à l'épaisseur des échantillons de résidu lors des essais de diffusion et de consommation de l'oxygène, afin notamment d'assurer un meilleur contrôle sur le degré de saturation. On pourrait, par exemple, faire les essais avec des volumes plus importants afin de minimiser l'erreur commise ou travailler avec des duplicata. D'autres analyses d'imprécisions et d'incertitudes pourraient être menées pour vérifier les tendances observées dans ce mémoire.

Il serait pertinent d'étudier plus spécifiquement la réactivité intrinsèque des résidus sulfureux, et évaluer les facteurs d'influence. La question de l'évolution des caractéristiques minéralogiques et granulométriques dans le temps devrait aussi être abordée plus précisément. Une évolution a été mise en évidence par certaines analyses, mais il est primordial de pouvoir mieux quantifier cette évolution.

L'effet du degré de saturation, lorsqu'il excède environ 80%, devrait aussi faire l'objet de travaux additionnels.

L'élargissement de la diversité des résidus étudiés serait intéressant pour vérifier si les comportements observés ici peuvent être généralisés.

La mesure de la surface spécifique sur les échantillons pourrait être utilisée pour comparer les modèles analytiques et améliorer l'évaluation du diamètre équivalent.

La répartition non uniforme de la pyrite au sein d'un résidu, en terme granulométrique, est un facteur important qui devrait aussi être pris en compte. Il serait intéressant d'évaluer cet aspect pour une multitude de résidus afin de corriger une des hypothèses (qui semble erronée) émise par Collin (1987) et ajuster l'équation qui en découle.

Les résultats des essais de consommation d'oxygène pourraient être présentés sous forme semi-logarithmique (avec $\log t$) pour mieux déceler la tendance ; ceci pourrait faciliter l'interprétation des résultats.

BIBLIOGRAPHIE

- Aachib, M. (1997). Étude en laboratoire de la performance des barrières de recouvrement constituées de rejets miniers pour limiter le DMA. Thèse de doctorat, Département de Génie Minéral, École Polytechnique de Montréal. 298p
- Aachib, M., Aubertin, M., & Mbonimpa, M. (2002). Laboratory Measurements and Predictive Equations for Gas Diffusion Coefficient of Unsaturated Soils. In Proceedings of 55th Canadian Geotechnical Conference and 3rd joint IAH-CNC and CGS Conference, 163-172, (2002), Niagara Falls, ON.
- Aachib, M., Mbonimpa, M., Aubertin, M. (2004). Measurement and prediction of the oxygen diffusion coefficient in unsaturated media, with applications to soil covers. *Water, Air and Soil Pollution*, 156: 163-193.
- ASTM, 2007. Standard test method for particle-size analysis of soils. ASTM D422-63. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa
- ASTM, 2010. Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter. ASTM D5084-10. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa.
- ASTM, 2011. Standard practise for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). ASTM D2487-11. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa
- ASTM, 2012. Standard practise for reducing samples of aggregate to testing size. ASTM C702/C702M-11. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa.
- ASTM, 2012. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbt/ft³ (2,700 kN-m/m³)). ASTM D1557-12. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa.
- ASTM, 2014. Standard test Methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. ASTM D854-14. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa
- Aubertin, M., Bussière, B., Chapuis, R.P. (1994). Hydrogeological Properties of Homogenized Tailings Used in Cover Over Reactive Wastes. *47th Canadian Geotechnical Conference*, p. 483-493.
- Aubertin, M., Ricard, J.-F., Chapuis, R.P. (1995). Study of Capillary Properties of Mine Tailings: Measurements and Modeling. *48th Canadian Geotechnical Conference*, p. 17-24.
- Aubertin, M., Bussière, B., Aachib, M., Chapuis, R.P. (1996). Une modélisation numérique des écoulements non saturés dans des couvertures multicouches en sols. *Hydrogéologie*, 1, p. 3-13

- Aubertin, M., Bussière, B., Barbera, J.M., Chapuis, R.P., Monzon, M., Aachib, M. (1997). Construction and instrumentation of in situ test plots to evaluate covers built with clean tailings. *Proceedings of the 4th International Conference Canadienne de Géotechnique Environnementale*. p.113-127.
- Aubertin, M., Bussière, B., Chapuis, R.P. (1998). Field Investigation of Covers With Capillary Effect to Control Acid Mine Drainage. *CIM*, p. Au1-Au9.
- Aubertin, M., Authier, K., Joanes, A.-M., Monzon, M., Aachib, M. (1999). Gas Diffusion Through a GCL. *Geosynthetics '99 Conference Proceedings : Specifying Geosynthetics and Developing Design Details*, v. 1, p. 181-194
- Aubertin, M., Aachib, M., Authier, K. (2000). Evaluation of Diffusive Gas Flux Through Covers With a Gcl. *Geotextiles and Geomembranes*, 18(2-4), p. 215-233
- Aubertin, A., Bussière, B., Bernier, L. (2002). Environnement et Gestion des rejets miniers. *Manuel sur cédérom*. Presses internationales Polytechnique. (<http://www.polymtl.ca/pub/doc.php?id=6887&l=fr>).
- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B., Chapuis, R.P. (2003). A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, p.1104-1122.
- Aubertin, M., Cifuentes, E., Apithy, S.A., Bussiere, B., Molson, J., Chapuis, R.P. (2009). Analyses of Water Diversion Along Inclined Covers With Capillary Barrier Effects. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(10), p. 1146-1164.
- Aubertin, M., Bussière, & B., Zagury, G., (2011). La gestion des rejets miniers au Québec, in Institut du nouveau monde (Ed.), *L'état du Québec 2011* (pp 225-232). Institut du nouveau monde.
- Aubertin, M., Pabst, T., Bussière, B., James, M., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M., Maqsoud, A., 2015. Revue des meilleures pratiques de restauration des sites d'entreposage de rejets miniers générateurs de DMA. Symposium 2015 - Rouyn-Noranda – sur l'environnement et les mines.
- Benzaazoua, M., Bussière, B., Demers, I., Aubertin, M., Fried, É., Blier, A. (2008). Integrated mine tailings management by combining environmental desulphurization and cemented paste backfill : Application to mine Doyon, Quebec, Canada. *Minerals Engineering*, 21, 330–340
- Blowes, D.W., Ptacek, C.J. (1994). Acid-neutralization mechanisms in inactive mine tailings. *Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Waste*, Jambor, J.L., Blowes, D.W. (eds.). Mineralogical Association of Canada. Special Vol. 22, p.272-292.
- BNQ (2013). Sols – Analyse granulométrique des sols inorganiques. BNQ 2560-040. Bureau de normalisation du québec. 333, rue franquet, québec, canada.

Boulanger-Martel, V., Bussière, B., Côté, J., Mbonimpa, M., 2015. Influence of freeze–thaw cycles on the performance of covers with capillary barrier effects made of crushed rock–bentonite mixtures to control oxygen migration. *Canadian Geotechnical Journal*, (doi: 10.1139/cgj-2015-0155).

Brooks, R.H., & Corey, A.T. (1964). Hydraulic properties of porous media. Colorado State University, Fort Collins, Colo. Hydrology Paper No. 3.

Bussière, 1999. Étude du comportement hydrique de couvertures avec effets de barrière capillaire inclinées à l'aide de modélisations physiques et numériques. Thèse de doctorat, Département des Génies Civil, Géologique et des Mines, École Polytechnique de Montréal. 393p.

Bussière, 2007. Colloquium 2004 : Hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposal approaches. *Canadian Geotechnical Journal*, 44, 1019-1052.

Bussiere, B., Aubertin, M., Chapuis, R.P. (2003). The Behavior of Inclined Covers Used As Oxygen Barriers. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(3), p. 512-535.

Chapuis, R.P. (2012). Influence of element size in numerical studies of seepage : unsaturated zones, steady state. *Geotechnical news*, 30(3) , p.27-30

Chapuis, R.P., Légaré, P-P. (1992). A simple method for determining the surface area of fine aggregates and fillers in bituminous mixtures. Effects of aggregates and mineral fillers on asphalt mixture performance, ASTM STP 1147, R.C.Meininger, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

Chapuis, R.P., Chenaf, D., Bussière, B., Aubertin, M., Crespo, R. (2001). A user's approach to assess numerical codes for saturated and unsaturated seepage conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, 38 , p.1113-1126.

Chapuis, R.P., & Aubertin, M. (2003). On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(3), 616-628.

Chen, Y.W. and Wang, P.J. (1989). Dissolution of spherical solid particles in a stagnant fluid: an analytical solution. *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 67, p.870-872.

Collin, M. (1987). Mathematical modeling of water and oxygen transport in layered soil covers for deposit of pyritic mine tailings. *Licenciate Treatise*, Department of Chemical Engineering, Royal Institute of technology, Stockholm, Sweden.

Collin, M., et Rasmuson, A. (1988). A comparison of gas diffusivity models for unsaturated porous media. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 52.

Cosset, G. (2009). Comportement hydrogéologique d'une couverture monocouche sur des résidus miniers sulfureux : essais en colonne et simulations numériques. Mémoire de Maîtrise, Département CGM, Ecole Polytechnique de Montréal, 217p.

- Dagenais, A-M., Mbonimpa, M., Bussière, B., Aubertin, M., 2013. A modified oxygen consumption test to evaluate gas flux through oxygen barrier cover systems. *Geotechnical testing journal*, Vol 35, p150-158.
- Delage, P., & Cui, Y.J. (2000). L'eau dans les sols non saturés. *Techniques de l'Ingénieur*, 1, C301.1-C301.20.
- Delleur, J.W. (1998). *The Handbook of Groundwater Engineering*. CRC Press.
- Éthier, M-P.. 2011. Évaluation du comportement géochimique en conditions normale et froides de différents stériles présents sur le site de la mine raglan. Mémoire de Maîtrise, UQAT, 238p.
- Ethier, M.P., Bussière, B., Aubertin, M., Maqsoud, A., Demers, I., Lacroix, R. (2013). In situ evaluation of the elevated water table technique combined with a monolayer cover on reactive tailings: monitoring strategy and preliminary results. *GeoMontreal 2013: Geosciences for Sustainability, 66th CGS Conference*, Montreal, QC, 9p.
- Evangelou, V.P. (1995). *Pyrite Oxidation and Its Control*. CRC Press. 285p.
- Fredlund, D.G., Xing, A., & Huang, S. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil–water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 533–546.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall.
- Gardner, W.R. (1958). Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.*, 85, 228–232.
- Gbor, P.K., Jia, C.Q. (2004). Critical evaluation of coupling particle size distribution with the shrinking core model. *Chemical Engineering Science*, Vol. 59, p.1979 – 1987.
- GeoSlope Int. (2007). *Vadose/W User's Manual*, Third Edition. Copyright 1991-2005. Geo-Slope Ltd. Calgary, Alberta, Canada.
- Godbout, J. (2012). Réactivité des remblais miniers cimentés contenant de la pyrrhotite et propriétés hydrogéologiques. *Thèse Doctorat – Université du Québec en Abitibi et Témiscamingue, Québec, Canada*, 327p.
- Gómez-Barea, A., Leckner, B., Villanueva Perales, A.L., Campoy, M. (2012). Analytical solutions of sharp interface models with nth order kinetics. Application to char conversion. *Chemical Engineering Journal*, Vol.183, p.408– 421.
- Gosselin, M. (2007). Etude de l'influence des caractéristiques hydrogéochimiques des résidus miniers réactifs sur la diffusion et la consommation de l'oxygène. Mémoire de maîtrise, Département des Génies Civil, Géologique et des Mines, École Polytechnique de Montréal, 216p.
- Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press. San Diego

- Hollings, P., Hendry, M.J., Nicholson, R.V. and Kirkland, R.A. (2001). Quantification of oxygen consumption and sulphate release rates for waste rock piles using kinetic cells: Cluff lake uranium mine, northern Saskatchewan, Canada, *Applied Geochemistry*, 16, p.1215-1230.
- Hsu, W-L., Lin, M-J., Hsu, J-P. (2009). Dissolution of Solid Particles in Liquids : A Shrinking Core Model. *World Academy of Science, Engineering and Technology* Vol.53, p. 913-918.
- Hutchisson, I.P.G., Ellison, R.D. (1992). Mine Waste Management: A Resource for Mining Industry Professionals, *Regulators and Consulting Engineers*. Lewis Publishers.
- Huminicki, D.M.C., Rimstidt, J.D., 2009. Iron oxyhydroxide coating of pyrite for acid mine drainage control. *Applied Geochemistry*, 24, 1626–1634
- Jambor, J.L. (1994). Mineralogy of sulfide-rich tailings and their oxidation products. *Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Waste*, Jambor J.L., Blowes, D.W. (eds.). Mineralogical Association of Canada. Special Vol. 22, p.59-102.
- Jambor, J.L., Blowes, D.W., Ritchie, A.I.M. (2003). *Environmental aspects of mine wastes*.
- Kim, H., & Benson, C.H. (2004). Contributions of advective and diffusive oxygen transport through multilayer composite caps over mine waste. *J. Contam. Hydrol.*, 71, 193–218.
- Kirby, C.S., Thomas, H.M., Southam, G., Donald, R. (1999). Relative contributions of abiotic and biological factors in Fe(II) oxidation in time drainage. *Applied geochemistry*, 14, 511-530.
- Kleinmann, R.L.P., Crerar, D.A., Pacelli, R.R. (1981). Biogeochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation. *Mining Engineering*, Mar'81:300-304.
- Kovacs, G. (1981). Seepage hydraulics. Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Kwong, Y.T.J. (1993). Prediction and prevention of acid rock drainage from a geological and mineralogical perspective. *Report 1.32.1, Canadian Mine Environment Neutral Drainage (MEND)*
- Lawrence, R.W., & Wang, Y. (1997). Determination of neutralization potential in the prediction of acid rock drainage. In Proceedings of the 4th Int. Conf. On Acid Rock Drainage. MEND, NRC, Ottawa, ON, 1, 451-464.
- Leduc, L.G. (1997). Bacteria: An introduction. *Short Course Handbook on Biological – Mineralogical Interactions*, McIntosh, J.M., Groat. L.A. (eds.). Mineralogical Association of Canada. Special Vol. 25, p.1-14.
- Lemos, V.P., Da Costa, M.L., Lemos, R.L., De Faria, M.S.G. (2007). Vivianite and siderite in lateritic iron crust : an example of bioreduction. *Quim. Nova*, Vol. 30, No. 1, 36-40, 2007
- Martin, V. (2004). Étude des propriétés non saturées des stériles miniers. Mémoire de maîtrise, Département des Génies Civil, Géologique et des Mines, École Polytechnique de Montréal, 219p


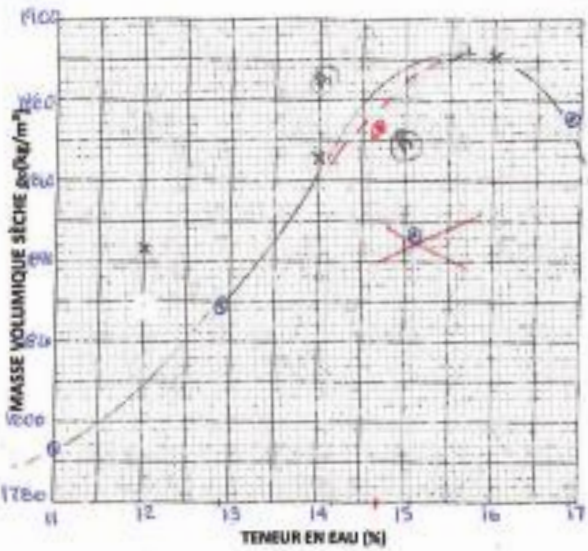
- Martin, V. (2006). Martin, V., Aubertin, M., McMullen, J., 2006. Surface disposal of paste tailings. Proceedings of the 5th ICEG Environmental Geotechnics: Opportunities, Challenges and Responsibilities for Environmental Geotechnics, Cardiff, UK, June, 26–30, vol. 2. pp. 1471–1478.
- Mayer, K.U., Benner, S.G., & Blowes, D.W. (1999). The reactive transport model min3p - Application to acid mine drainage generation and treatment - Nickel Rim Mine site, Sudbury, Ontario. In Proceedings of Sudbury'99 Conference on Mining and the Environment, Sudbury, ON.
- Mayer, K.U., Frind, E.O., Blowes, D.W. (2002). Multicomponent reactive transport modeling in variably saturated porous media using a generalized formulation for kinetically controlled reaction. *Water resources research*, vol 38, n.9, 1174.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Chapuis, R.P., Bussière, B. (2002). Practical pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity. *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.20, p.235–259.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M. (2003). Mouvement des gaz en milieu poreux partiellement saturés. École polytechnique de Montréal, *EPM-RT-2003-04*.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Aachib, M., Bussière, B. (2003). Diffusion and consumption of oxygen in unsaturated cover materials. *Canadian Géotechnical Journal*, J.40: 916-932.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Bussière, B. (2011). Oxygen consumption test to evaluate the diffusive flux into reactive tailings: interpretation and numerical assessment. *Canadian Geotechnical Journal*, 48: 878–890
- Mbonimpa, M., Awoh, S.A., Aubertin, M. (2012). A simple interpretation for the modified oxygen consumption test on sulphide tailings. 65th Canadian Geotechnical Conference, Winnipeg, Manitoba, Canada.
- McCarthy, 2007. Essentials of Soil Mechanics and Foundations: Basic Geotechnics (7th Edition).
- McIntosh, J.M., Silver, M., Groat, L.A. (1997). Bacteria and the breakdown of sulfide minerals. Short Course Handbook on Biological – Mineralogical Interactions, McIntosh, J.M., Groat, L.A. (eds.). *Mineralogical Association of Canada*. Special Vol. 25, p.63-92.
- MERN, 2007 (<https://www.mern.gouv.qc.ca/mines/quebec-mines/2007-06/manitou.asp>)
- Millington, R.J., Shearer, R.C. (1971). Diffusion in aggregated porous media. *Soil Science*, 111, 372-378.
- Mines Québec, 2013, <http://minesqc.com/fr/base-de-connaissances/fiche/goldex/>
- Miyazaki, T. (2006). Water Flox in Soils. Published by CRC Press

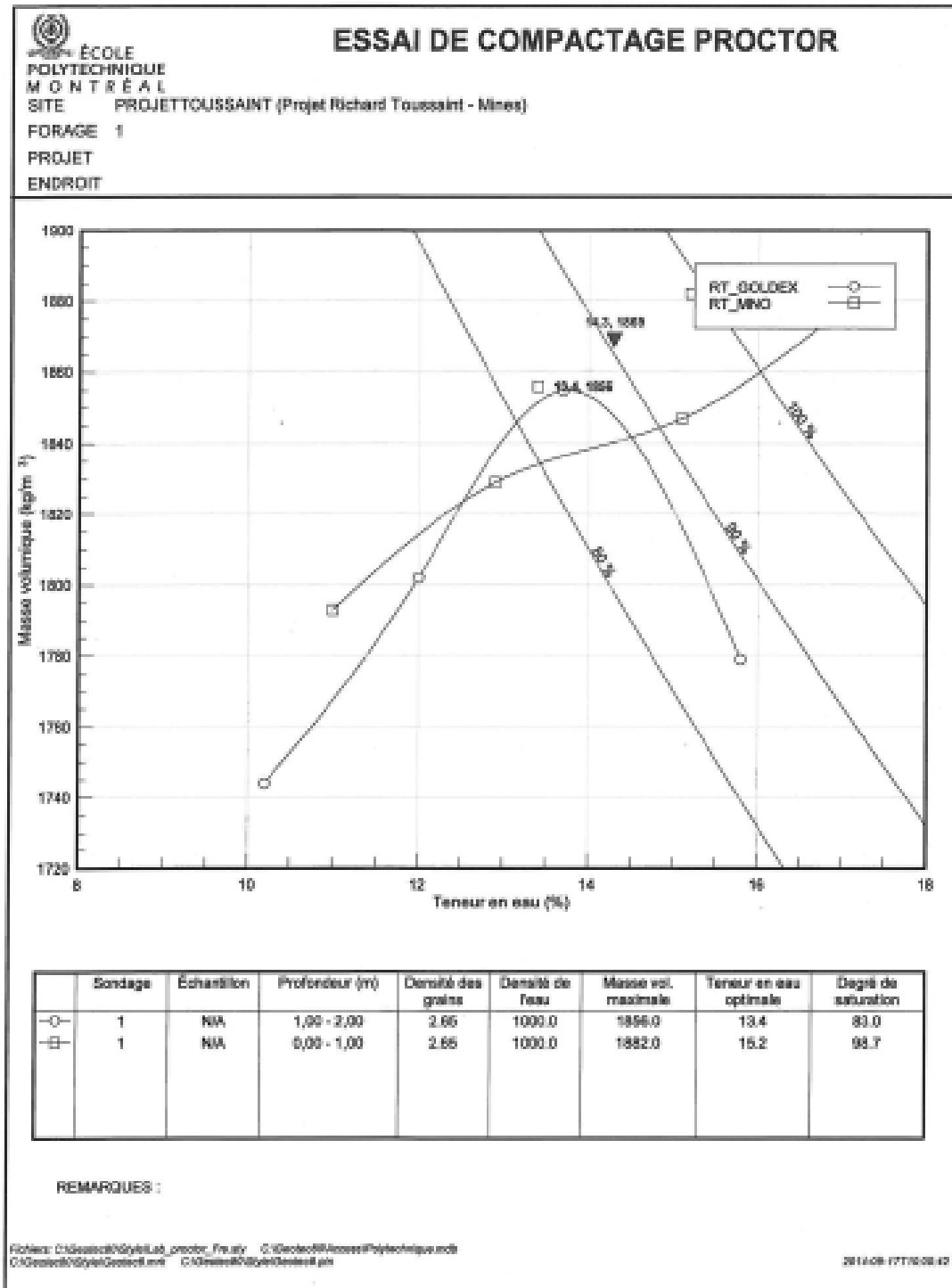
- Molson, J.W., Frind, E.O., Aubertin, M., & Blowes, D. (2005). POLYMIN v3.0 , 2d reactive mass transport model with oxygen diffusion, sulfide oxidation and geochemical speciation. User guide. Polymin (2005).
- Molson, J., Aubertin, M., Bussière, B., Benzaazoua, M. (2008). Geochemical transport modelling of drainage from experimental mine tailings cells covered by capillary barriers. *Applied Geochemistry*, 23, 1-24.
- Monzon Boj, M. 1998 Étude en laboratoire des propriétés hydrogéotechniques des résidus miniers utilisés comme barrière de recouvrement. Mémoire de maîtrise. Génie civil, géologique et des mines Ecole Polytechnique de Montréal. 150p.
- Morin, K.A., Hutt, N.M. (1997). *Environmental Geochemistry of Mine site Drainage: Practical Theory and Case Studies*. MDAG Publishing. 333p.
- Mualem, Y. (1976). A catalogue of the hydraulic properties of unsaturated soils. Development of methods, tools and solutions, for unsaturated flow with application to watershed hydrology and other field. Research Project 442, Technion Israel Institute of Technology, Haifa, Israel.
- Mustin, C., Berthelin, J., Marion, P., de Donato, P. (1992). Corrosion and electrochemical oxidation of a pyrite by thiobacillus ferrooxidans. *Applied and Environmental Microbiology*, 58(4):1175-1182.
- Nicholson, R.V. (1994). Laboratory studies of pyrrhotite oxidation kinetics in Jambor, J.L., & Blowes, D.W. (eds.), *Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Waste* (pp 163-183). Waterloo : Mineralogical Association of Canada.
- Nicholson, R.V., Gillham, R.W., Cherry, J.A., and Reardon, E.J. (1989). Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining layers as oxygen barriers. *Canadian Geotechnical Journal*, 26: 1-8.
- Nicholson, R.V., Scharrer, J.M. (1994). Laboratory studies of pyrrhotite oxidation kinetics. *Environmental Geochemistry of Sulfide Oxidation*, Alpers, C.N., Blowes, D.W. (eds.). *American Chemical Society. Symposium Series 550*, p.14-30
- Nordstrom, D.K. (2000). Advances in the hydrogeochemistry and microbiology of acid mine waters. *International Geology Review*, vol 42, p 499-515.
- Ouangrawa, M. (2007). Etude expérimentale et analyse numérique des facteurs qui influencent le comportement hydrogéochimique de résidus miniers sulfureux partiellement saturés. *Thèse Doctorat – Génie Minérale, CGM, Ecole Polytechnique de Montréal, Québec, Canada*, 464p
- Pabst, T. (2011). Étude expérimentale et numérique du comportement hydro-géochimique de recouvrements places sur des résidus sulfureux partiellement oxydés. *Thèse Doctorat – Génie Minérale, CGM, Ecole Polytechnique de Montréal, Québec, Canada*, 582p.
- Paktunc, A.D. (1999). Mineralogical constraints on the determination of neutralization potential and prediction of acid mine drainage. *Environ. Geol.*, 39, 103–112.

- Peregoedova, A. (2012). Etude expérimentale des propriétés hydrogéologiques des roches stériles à une échelle intermédiaire de laboratoire. Mémoire de maîtrise, Département des Génies Civil, Géologique et des Mines, École Polytechnique de Montréal, 229p
- Perkins, E.H., Nesbitt, H.W., Gunter, W.D., St-Arnaud, L.C., Mycroft, J.R. (1995). Critical review of geochemical processes and geochemical models adaptable for prediction of acidic drainage from waste rock. *Report 1.42.1, Mine Environment Neutral Drainage (MEND)*.
- Richards, L.A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous medium. *Journal Physics*, vol 1 : 318-333.
- Rimstidt, J.D., Vaughan, D.J. (2002). Pyrite oxidation: A state-of-the-art assessment of the reaction mechanism. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 67, No. 5, pp. 873–880, 2003
- Ritcey, G.M. (1989). Tailings Management, Problems and Solutions in the Mining *Industries*. Elsevier.
- Ritchie, A.I.M. (1994). The waste rock environment in Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Waste, Jambor, J.L., Blowes, D.W. (eds.). *Mineralogical Association of Canada*. Special Vol. 22, p.133-161.
- Rowe, R.K., Booker, J.R., Fraser, M.J. (1994). POLLUTEv6 and POLLUTE-GUI user's guide. *GAEA Environmental Engineering Ltd.*, London, Ontario.
- Safari, V., Arzpeyma, G., Rashchi, F., Mostoufi, N. (2009). A shrinking particle - shrinking core model for leaching of a zinc ore containing silica. *Int. J. Miner. Process.* Vol.93, p.79–83
- Sherwood, T.K., Pigford, R.L. and Wilke, C.R. (1975). Mass transfer. *New York : McGraw Hill*.
- SRK (1991). Guide technique préliminaire sur le drainage rocheux acide. (une traduction de "Draft Acid Rock Drainage Technical Guide", 1989, BCAMD Task Force). Vol. I et II, *Centre de Recherches Minérales, Québec*.
- Stormont, J.C., Morris, C.E. (1998). Method to estimate water storage capacity of capillary barriers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(4):297-302.
- Stumm, W., Morgan, J.J. (1981). *Aquatic Chemistry*. John Wiley & Sons.
- Toussaint, R. (2010). Détermination de l'importance du rôle des bactéries lors d'essais de consommation d'oxygène par des résidus miniers provenant du site Manitou, Val d'or, Québec. Rapport de Stage pour Master Sciences de la Terre, Option Géosciences et Environnement, USTL Lille1 (stage à l'École Polytechnique de Montréal).
- van Genuchten, M.Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892–898.
- van Genuchten, M.Th., Leij, F.J., & Yates, S.R. (1991). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils.

- Villeneuve, M. (2004). Evaluation du comportement géochimique à long terme de rejets miniers à faible potentiel de génération d'acide à l'aide d'essais cinétiques. Mémoire de maîtrise, Département des Génies Civil, Géologique et des Mines, École Polytechnique de Montréal, 287p.
- Williamson, M.A., & Rimstidt, J.D. (1994). The kinetics and electrochemical rate-determining step of aqueous pyrite oxidation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58, 5443-5454.
- Yagi, S., Kunii, D., (1955). Studies on combustion of carbon particles in flames and fluidized beds. In: Fifth Symposium (International) on Combustion, Reinhold, New York, pp. 231–244.
- Yanful, E.K. 1993. Oxygen diffusion through soil covers on sulphidic mine tailings. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 119 (8): 1207-1228.
- Zhan, G., Aubertin, M., Mayer, A., Burke, K., McMullen, J. (2001). Capillary cover design for leach pad closure. *Transaction of the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.*, 310:104-111.

ANNEXE A – RÉSULTATS DES ESSAIS PROCTOR MODIFIÉ SUR LES RÉSIDUS MNO ET GOLDEX

 LABORATOIRE DE GÉOTECHNIQUE Essai de compactage																						
Identification: <u>SITE</u> Localisation: _____ Date: <u>2014/09/15</u> Notes: _____	Provenance: <u>RT MNO 09-2014 (MNO)</u> Manipulateur: <u>GP</u>	Essai L6310 ASTM D698 D1557																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">Caractéristiques</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>ρ_s</td><td></td></tr> <tr><td>% < 80µm</td><td></td></tr> <tr><td>% < 5mm</td><td></td></tr> <tr><td>% < 14mm</td><td></td></tr> <tr><td>Norme</td><td><u>ASTM D1557</u></td></tr> <tr><td>Méthodes</td><td><u>A</u></td></tr> <tr><td>Hauteur moule cm</td><td><u>11.67</u></td></tr> <tr><td>Diamètre moule cm</td><td><u>10.13</u></td></tr> <tr><td>Volume moule cm³</td><td><u>940.5</u></td></tr> </tbody> </table>			Caractéristiques		ρ _s		% < 80µm		% < 5mm		% < 14mm		Norme	<u>ASTM D1557</u>	Méthodes	<u>A</u>	Hauteur moule cm	<u>11.67</u>	Diamètre moule cm	<u>10.13</u>	Volume moule cm ³	<u>940.5</u>
Caractéristiques																						
ρ _s																						
% < 80µm																						
% < 5mm																						
% < 14mm																						
Norme	<u>ASTM D1557</u>																					
Méthodes	<u>A</u>																					
Hauteur moule cm	<u>11.67</u>																					
Diamètre moule cm	<u>10.13</u>																					
Volume moule cm ³	<u>940.5</u>																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr><td>Densité kg/m³</td><td><u>1882</u></td></tr> <tr><td>Teneur en eau optimale %</td><td><u>15.3</u></td></tr> <tr><td>Degré de saturation %</td><td></td></tr> </tbody> </table>		Densité kg/m ³	<u>1882</u>	Teneur en eau optimale %	<u>15.3</u>	Degré de saturation %																
Densité kg/m ³	<u>1882</u>																					
Teneur en eau optimale %	<u>15.3</u>																					
Degré de saturation %																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">MASSE VOLUMIQUE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>% d'eau ajoutée</td> <td><u>10</u> <u>12</u> <u>14</u> <u>16</u> <u>(21.4+16)</u></td> </tr> <tr> <td>Masse de sol + moule g</td> <td><u>6074.6</u> <u>6143.9</u> <u>6222.7</u> <u>6264.9</u> <u>6222.8</u></td> </tr> <tr> <td>Masse du moule g</td> <td><u>4202.4</u> <u>4202.4</u> <u>4202.4</u> <u>4202.4</u> <u>4202.4</u></td> </tr> <tr> <td>Masse du sol g</td> <td><u>1872.2</u> <u>1941.5</u> <u>2020.3</u> <u>2062.5</u> <u>2020.4</u></td> </tr> <tr> <td>Masse volumique sol humide kg/m³</td> <td><u>1991</u> <u>2064</u> <u>2127</u> <u>2193</u> <u>2148</u></td> </tr> <tr> <td>Masse volumique sol sec kg/m³</td> <td><u>1793</u> <u>1829</u> <u>1847</u> <u>1876</u> <u>1873</u></td> </tr> </tbody> </table>		MASSE VOLUMIQUE		% d'eau ajoutée	<u>10</u> <u>12</u> <u>14</u> <u>16</u> <u>(21.4+16)</u>	Masse de sol + moule g	<u>6074.6</u> <u>6143.9</u> <u>6222.7</u> <u>6264.9</u> <u>6222.8</u>	Masse du moule g	<u>4202.4</u> <u>4202.4</u> <u>4202.4</u> <u>4202.4</u> <u>4202.4</u>	Masse du sol g	<u>1872.2</u> <u>1941.5</u> <u>2020.3</u> <u>2062.5</u> <u>2020.4</u>	Masse volumique sol humide kg/m ³	<u>1991</u> <u>2064</u> <u>2127</u> <u>2193</u> <u>2148</u>	Masse volumique sol sec kg/m ³	<u>1793</u> <u>1829</u> <u>1847</u> <u>1876</u> <u>1873</u>							
MASSE VOLUMIQUE																						
% d'eau ajoutée	<u>10</u> <u>12</u> <u>14</u> <u>16</u> <u>(21.4+16)</u>																					
Masse de sol + moule g	<u>6074.6</u> <u>6143.9</u> <u>6222.7</u> <u>6264.9</u> <u>6222.8</u>																					
Masse du moule g	<u>4202.4</u> <u>4202.4</u> <u>4202.4</u> <u>4202.4</u> <u>4202.4</u>																					
Masse du sol g	<u>1872.2</u> <u>1941.5</u> <u>2020.3</u> <u>2062.5</u> <u>2020.4</u>																					
Masse volumique sol humide kg/m ³	<u>1991</u> <u>2064</u> <u>2127</u> <u>2193</u> <u>2148</u>																					
Masse volumique sol sec kg/m ³	<u>1793</u> <u>1829</u> <u>1847</u> <u>1876</u> <u>1873</u>																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">TENEUR EN EAU</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Capsule No</td> <td><u>25</u> <u>183</u> <u>68</u> <u>160</u> <u>38</u></td> </tr> <tr> <td>Masse sol humide + capsule g</td> <td><u>246.6</u> <u>375.5</u> <u>331.9</u> <u>316.3</u> <u>324.9</u></td> </tr> <tr> <td>Masse sol sec + capsule g</td> <td><u>290.3</u> <u>310.2</u> <u>295.0</u> <u>277.9</u> <u>290.2</u></td> </tr> <tr> <td>Masse de l'eau g</td> <td><u>56.3</u> <u>65.3</u> <u>36.9</u> <u>38.4</u> <u>34.7</u></td> </tr> <tr> <td>Masse de la capsule g</td> <td><u>51.2</u> <u>65.5</u> <u>51.1</u> <u>64.5</u> <u>51.8</u></td> </tr> <tr> <td>Masse du sol sec g</td> <td><u>239.1</u> <u>274.7</u> <u>243.9</u> <u>215.4</u> <u>235.4</u></td> </tr> <tr> <td>Teneur en eau %</td> <td><u>11.0</u> <u>12.9</u> <u>15.1</u> <u>16.9</u> <u>14.7</u></td> </tr> </tbody> </table>		TENEUR EN EAU		Capsule No	<u>25</u> <u>183</u> <u>68</u> <u>160</u> <u>38</u>	Masse sol humide + capsule g	<u>246.6</u> <u>375.5</u> <u>331.9</u> <u>316.3</u> <u>324.9</u>	Masse sol sec + capsule g	<u>290.3</u> <u>310.2</u> <u>295.0</u> <u>277.9</u> <u>290.2</u>	Masse de l'eau g	<u>56.3</u> <u>65.3</u> <u>36.9</u> <u>38.4</u> <u>34.7</u>	Masse de la capsule g	<u>51.2</u> <u>65.5</u> <u>51.1</u> <u>64.5</u> <u>51.8</u>	Masse du sol sec g	<u>239.1</u> <u>274.7</u> <u>243.9</u> <u>215.4</u> <u>235.4</u>	Teneur en eau %	<u>11.0</u> <u>12.9</u> <u>15.1</u> <u>16.9</u> <u>14.7</u>	<u>REPRISE</u> 1910 1943 1866 1891 (Théorique) 1884 @ 14% 1868 @ 15%				
TENEUR EN EAU																						
Capsule No	<u>25</u> <u>183</u> <u>68</u> <u>160</u> <u>38</u>																					
Masse sol humide + capsule g	<u>246.6</u> <u>375.5</u> <u>331.9</u> <u>316.3</u> <u>324.9</u>																					
Masse sol sec + capsule g	<u>290.3</u> <u>310.2</u> <u>295.0</u> <u>277.9</u> <u>290.2</u>																					
Masse de l'eau g	<u>56.3</u> <u>65.3</u> <u>36.9</u> <u>38.4</u> <u>34.7</u>																					
Masse de la capsule g	<u>51.2</u> <u>65.5</u> <u>51.1</u> <u>64.5</u> <u>51.8</u>																					
Masse du sol sec g	<u>239.1</u> <u>274.7</u> <u>243.9</u> <u>215.4</u> <u>235.4</u>																					
Teneur en eau %	<u>11.0</u> <u>12.9</u> <u>15.1</u> <u>16.9</u> <u>14.7</u>																					



ESSAI DE COMPACTAGE PROCTOR

ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTREAL
SITE PROJETTOUSSAINT (Projet Richard Toussaint - Mines)
FORAGE 1
PROJET 3.00
ENDROIT

Dr = 2.65

	Sondage	Echantillon	Prondeur (m)	Densité des grains	Densité de l'eau	Masse vol. maximale	Teneur en eau optimale	Degré de saturation
○	1	N/A	1,00 - 2,00	2.65	1000.0	1855.0	13.4	83.0
□	1	N/A	0,00 - 1,00	2.65	1000.0	1882.0	15.2	98.7

REMARQUES :

Fichier: C:\desec\drytest\as_prestat_Proyet_ C:\desec\drytest\Polytechnique.sdb
C:\desec\drytest\desec\as sdb C:\desec\drytest\desec\as sdb

2014-09-17T18:29:08



ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL

ESSAI PROCTOR

Annexe : A Figure : 1

Projet : _____

Dossier : _____

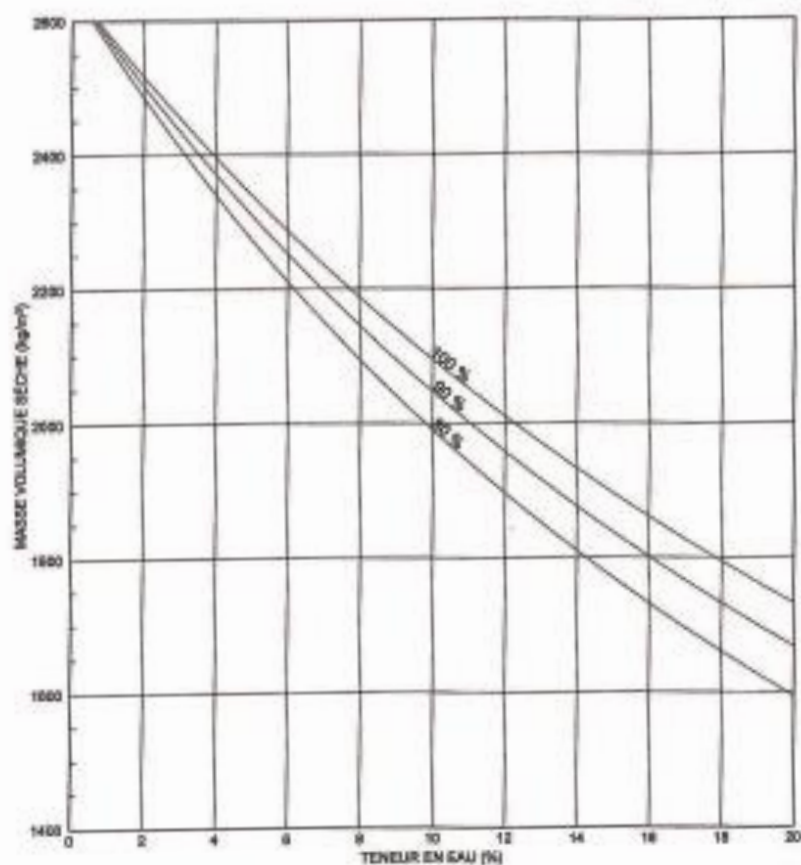
PROVENANCE :

PROFONDEUR : à m

ÉCHANTILLON NO :

PRÉLEVÉ LE :

REMARQUE :



Méthode d'essai
BNQ 2501-255

Densité des grains

Masses vol. sèche. max
0 kg/m³

Teneur en eau optimale
0.00 %

ANNEXE B – RÉSULTATS DES ESSAIS DE PERMÉABILITÉ À CHARGE VARIABLE EN CELLULE TRIAXIALE SUR LES RÉSIDUS MNO ET GOLDEX

Échantillon	Goldex
Date	2014-07-04
Température	24,5
Hauteur (cm)	10,31
Surface (cm ²)	40,38
Volume (cm ³)	416,40
D _r	2,757
Masse humide (g)	706,6
Masse sèche (g)	630,33
Masse volumique humide (g/cm ³)	1,697
Masse volumique sèche (g/cm ³)	1,514
Teneur en eau échantillon (%)	12,10
Teneur en eau totale (%)	27,23
Indice des vides	0,821
Porosité	0,451
Degré de saturation (%)	91,39
Section burette base essai 1 (cm ²)	0,311
Section burette tête essai 1 (cm ²)	0,313
Section burette base essai 2 (cm ²)	0,090
Section burette tête essai 2 (cm ²)	0,087

Temps (s)	Lecture tête (cm ³)	Lecture base (cm ³)	Volume entré (cm ³)	Volume sorti (cm ³)	Charge (cm)	ln(h)	K (cm/s)	K ₂₀ (cm/s)
0,00	1,06	0,24	0,00	0,00	0,8	-0,2	-	-
26,51	1,03	0,27	0,03	0,03	0,8	-0,3	1,19×10 ⁻⁴	1,08×10 ⁻⁴
54,35	1,01	0,31	0,06	0,07	0,7	-0,4	1,22×10 ⁻⁴	1,10×10 ⁻⁴
84,01	0,98	0,34	0,09	0,10	0,6	-0,4	1,23×10 ⁻⁴	1,11×10 ⁻⁴
115,87	0,95	0,37	0,12	0,13	0,6	-0,6	1,24×10 ⁻⁴	1,12×10 ⁻⁴
152,66	0,92	0,40	0,15	0,17	0,5	-0,7	1,24×10 ⁻⁴	1,12×10 ⁻⁴
190,83	0,89	0,43	0,18	0,20	0,5	-0,8	1,25×10 ⁻⁴	1,13×10 ⁻⁴
236,87	0,86	0,47	0,21	0,23	0,4	-0,9	1,26×10 ⁻⁴	1,14×10 ⁻⁴
288,62	0,83	0,50	0,24	0,26	0,3	-1,1	1,26×10 ⁻⁴	1,14×10 ⁻⁴
350,19	0,80	0,53	0,27	0,29	0,3	-1,3	1,28×10 ⁻⁴	1,16×10 ⁻⁴
425,10	0,77	0,56	0,30	0,33	0,2	-1,6	1,30×10 ⁻⁴	1,18×10 ⁻⁴

Temps (s)	Lecture tête (cm ³)	Lecture base (cm ³)	Volume entré (cm ³)	Volume sorti (cm ³)	Charge (cm)	ln(h)	K (cm/s)	K20 (cm/s)
0,00	1,06	0,23	0,00	0,00	0,8	-0,2	-	-
7,14	1,03	0,26	0,03	0,03	0,8	-0,3	$1,19 \times 10^{-4}$	$1,08 \times 10^{-4}$
14,85	1,01	0,29	0,06	0,06	0,7	-0,3	$1,21 \times 10^{-4}$	$1,10 \times 10^{-4}$
23,25	0,98	0,33	0,09	0,10	0,6	-0,4	$1,22 \times 10^{-4}$	$1,11 \times 10^{-4}$
32,42	0,95	0,36	0,12	0,13	0,6	-0,5	$1,22 \times 10^{-4}$	$1,10 \times 10^{-4}$
42,59	0,92	0,39	0,15	0,16	0,5	-0,6	$1,22 \times 10^{-4}$	$1,11 \times 10^{-4}$
53,89	0,89	0,42	0,18	0,19	0,5	-0,8	$1,22 \times 10^{-4}$	$1,10 \times 10^{-4}$
66,56	0,86	0,45	0,21	0,22	0,4	-0,9	$1,22 \times 10^{-4}$	$1,10 \times 10^{-4}$
81,17	0,83	0,48	0,24	0,25	0,3	-1,1	$1,22 \times 10^{-4}$	$1,11 \times 10^{-4}$
98,22	0,80	0,51	0,27	0,28	0,3	-1,2	$1,23 \times 10^{-4}$	$1,11 \times 10^{-4}$
118,36	0,77	0,54	0,30	0,31	0,2	-1,5	$1,24 \times 10^{-4}$	$1,12 \times 10^{-4}$
144,00	0,74	0,57	0,33	0,34	0,2	-1,8	$1,26 \times 10^{-4}$	$1,14 \times 10^{-4}$
178,07	0,71	0,60	0,35	0,37	0,1	-2,2	$1,30 \times 10^{-4}$	$1,18 \times 10^{-4}$

Échantillon	MNO
Date	2014-07-04
Température	24,5
Hauteur (cm)	10,91
Surface (cm ²)	40,46
Volume (cm ³)	441,56
D _r	3,111
Masse humide (g)	805,2
Masse sèche (g)	729,38
Masse volumique humide (g/cm ³)	1,824
Masse volumique sèche (g/cm ³)	1,652
Teneur en eau échantillon (%)	10,40
Teneur en eau totale (%)	30,92
Indice des vides	0,883
Porosité	0,469
Degré de saturation (%)	108,90
Section burette base essai 1 (cm ²)	0,090
Section burette tête essai 1 (cm ²)	0,087
Section burette base essai 2 (cm ²)	0,090
Section burette tête essai 2 (cm ²)	0,087

Temps (s)	Lecture tête (cm ³)	Lecture base (cm ³)	Volume entré (cm ³)	Volume sorti (cm ³)	Charge (cm)	ln(h)	K (cm/s)	K ₂₀ (cm/s)
0,00	1,01	0,33	0,00	0,00	0,7	-0,4	-	-
41,08	0,98	0,36	0,03	0,03	0,6	-0,5	$2,65 \times 10^{-5}$	$2,40 \times 10^{-5}$
85,59	0,95	0,39	0,06	0,06	0,6	-0,6	$2,72 \times 10^{-5}$	$2,46 \times 10^{-5}$
137,73	0,92	0,42	0,09	0,09	0,5	-0,7	$2,69 \times 10^{-5}$	$2,43 \times 10^{-5}$
194,43	0,89	0,45	0,12	0,12	0,4	-0,8	$2,70 \times 10^{-5}$	$2,44 \times 10^{-5}$
259,90	0,86	0,48	0,15	0,15	0,4	-1,0	$2,70 \times 10^{-5}$	$2,44 \times 10^{-5}$
334,14	0,83	0,51	0,18	0,18	0,3	-1,2	$2,72 \times 10^{-5}$	$2,46 \times 10^{-5}$
422,32	0,80	0,54	0,21	0,21	0,3	-1,4	$2,75 \times 10^{-5}$	$2,49 \times 10^{-5}$
528,76	0,77	0,57	0,24	0,24	0,2	-1,6	$2,80 \times 10^{-5}$	$2,53 \times 10^{-5}$
669,11	0,74	0,61	0,27	0,27	0,1	-2,0	$2,89 \times 10^{-5}$	$2,61 \times 10^{-5}$
845,26	0,71	0,64	0,30	0,31	0,1	-2,7	$3,19 \times 10^{-5}$	$2,89 \times 10^{-5}$
1212,37	0,68	0,67	0,33	0,34	0,0	-4,8	$4,30 \times 10^{-5}$	$3,89 \times 10^{-5}$

Temps (s)	Lecture tête (cm ³)	Lecture base (cm ³)	Volume entré (cm ³)	Volume sorti (cm ³)	Charge (cm)	ln(h)	K (cm/s)	K ₂₀ (cm/s)
0,00	1,01	0,44	0,00	0,00	0,6	-0,6	-	-
49,19	0,98	0,47	0,03	0,03	0,5	-0,7	$2,73 \times 10^{-5}$	$2,47 \times 10^{-5}$
104,80	0,95	0,50	0,06	0,06	0,4	-0,8	$2,71 \times 10^{-5}$	$2,45 \times 10^{-5}$
166,71	0,92	0,54	0,09	0,10	0,4	-1,0	$2,84 \times 10^{-5}$	$2,57 \times 10^{-5}$
236,92	0,89	0,56	0,12	0,12	0,3	-1,1	$2,75 \times 10^{-5}$	$2,48 \times 10^{-5}$
322,45	0,86	0,59	0,15	0,15	0,3	-1,3	$2,78 \times 10^{-5}$	$2,51 \times 10^{-5}$
423,33	0,83	0,62	0,18	0,18	0,2	-1,6	$2,86 \times 10^{-5}$	$2,59 \times 10^{-5}$
551,60	0,80	0,66	0,21	0,21	0,1	-1,9	$2,97 \times 10^{-5}$	$2,68 \times 10^{-5}$
728,70	0,77	0,69	0,24	0,24	0,1	-2,5	$3,16 \times 10^{-5}$	$2,86 \times 10^{-5}$
1008,02	0,74	0,72	0,27	0,27	0,0	-3,8	$3,84 \times 10^{-5}$	$3,47 \times 10^{-5}$

ANNEXE C – RÉSULTATS DES ANALYSES LÉCO

# Echantillon	# Labo	Carbone *%m			Soufre *%m		
MNO 21-02-3019	LGC14178	0,440	0,448	0,441	11,2	12,1	9,65
MO 21-02-2019	LGC14179	0,063	0,065	0,063	1,25	1,28	1,39

*%m = 1g/100g

# Echantillon	# Labo	Carbone *%m			Soufre *%m		
MNO Bis	LGC14601	0,449	0,648	0,402	10,4	13,4	11,2
MNO fin	LGC14602	0,365	0,417	0,504	14,1	14,4	14,7
MNO moyen	LGC14603	0,510	0,467	0,465	12,3	12,2	12,1
MNO gros	LGC14604	0,302	0,374	0,330	9,81	8,53	7,92
MNO 25i	LGC14610	0,727	0,573	0,796	2,71	2,52	2,85
MNO 25f	LGC14611	0,800	1,27	1,01	2,78	3,53	3,88
MNO 50i	LGC14612	0,830	0,642	0,642	6,53	5,59	5,79
MNO 50f	LGC14613	0,579	0,649	0,874	5,11	4,88	6,64
MNO 75i	LGC14614	0,765	0,519	0,536	9,23	9,73	8,55
MNO 75f	LGC14615	0,592	1,020	0,504	8,03	9,04	7,85
Goldex	LGC14616	0,906	0,912	0,894	0,20	0,21	0,19

*%m = 1g/100g

# Echantillon	# Labo	Carbone *%m			Soufre *%m		
GOLDEX post essai	LGC14700	1,10	1,05	1,06	0,207	0,210	0,206
MNO fin post essai	LGC14701	0,486	0,465	0,544	13,1	12,2	13,9
MNO moyen post essai	LGC14702	0,410	0,506	0,725	8,31	10,2	10,3
MNO moyen égalisé	LGC14703	0,705	0,630	0,644	8,79	8,71	8,44
MNO fin égalisé	LGC14704	0,706	0,678	0,762	7,53	7,17	6,56

*%m = 1g/100g

# Echantillon	# Labo	Carbone *%m			Soufre *%m		
MNO fin égal post essai	LGC14751	0,682	0,668	0,702	7,50	8,04	7,86
MNO f- Gm	LGC14752	0,667	0,660	0,645	5,92	6,04	6,06
MNO f-Gf	LGC14753	0,756	0,777	0,761	5,40	5,42	5,40
MNO f-Gg	LGC14754	0,500	0,499	0,518	4,78	4,84	5,14

*%m = 1g/100g

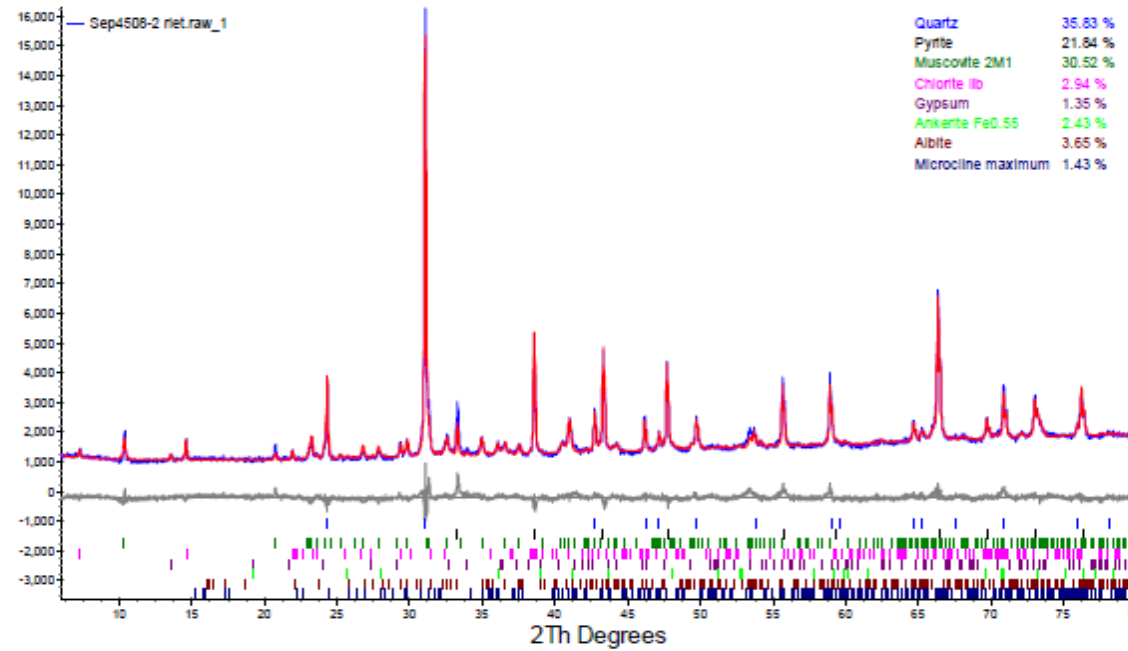
ANNEXE D – RÉSULTATS DES ANALYSES AUX DRX

#	Nom échantillon
36261	MNO fin RT L6C14602 17/07/2014
36262	MNO fin RT 08/2014
36263	MNO fin RT L6C14701 08/2014 post essai
36264	MNO fin égalisé RT L6C14704
36265	MNO moyen égalisé RT L6C14703
36266	MNO moyen RT 08/2014 Post essai
36267	MNO moyen RT L6C14702 08/2014 Post essai
36268	MNO moyen RT L6C14603 17/07/2014
36269	MNO gros RT L6C14604 17/07/2014
36270	MNO 50% RT 08/2014 Post essai
36271	MNO 75% RT 08/2014 Post essai
36272	MNO 25F RT 2014 L6C14611
36273	MNO 50F RT 2014 L6C14613
36274	MNO 75F RT 2014 L6C14615
36275	MNO Bis RT L6C14601 17/07/2014
36276	Goldex RT 2014 L6C14616
36277	MNO 25% RT 08/2014 Post essai
32483	Manitou 25%
32484	Manitou 50%
32485	Manitou 75%
32486	MO ____ R.Toussaint
32487	MNO ____ R.Toussaint
32488	MNO JuinA ____ R.Toussaint
32489	MNO JuinB ____ R.Toussaint
32490	25% R.T.
32491	50% R.T.
32492	75% R.T.

SGS

URSTM/UQAT
Custom XRD/M4508-SEP14
09/15/2014

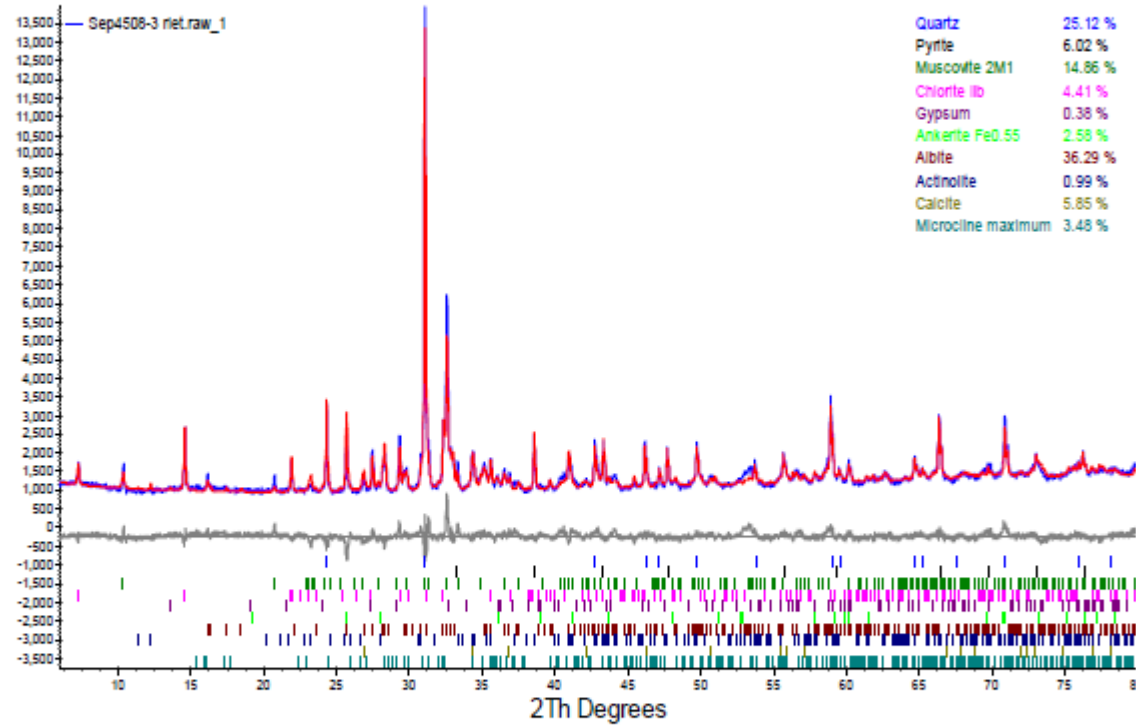
U: 32489





URSTM/UQAT
Custom XRD/MI4508-SEP14
09/15/2014

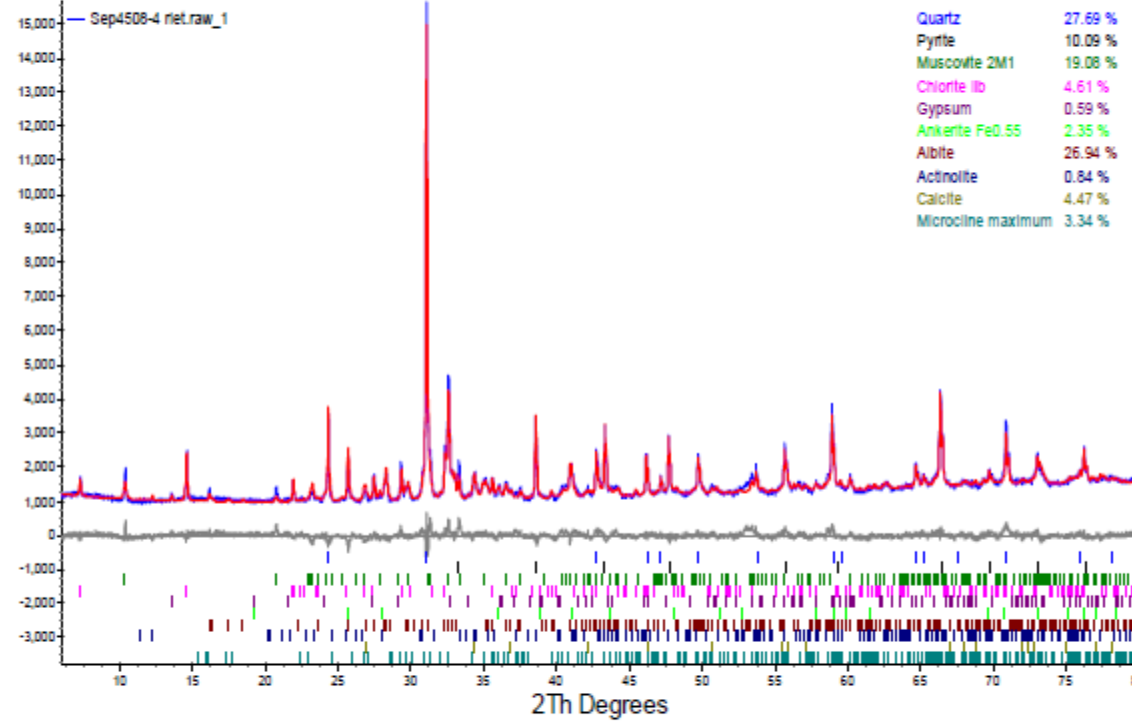
U: 32490





URSTM/UQAT
Custom XRD/M4508-SEP14
09/15/2014

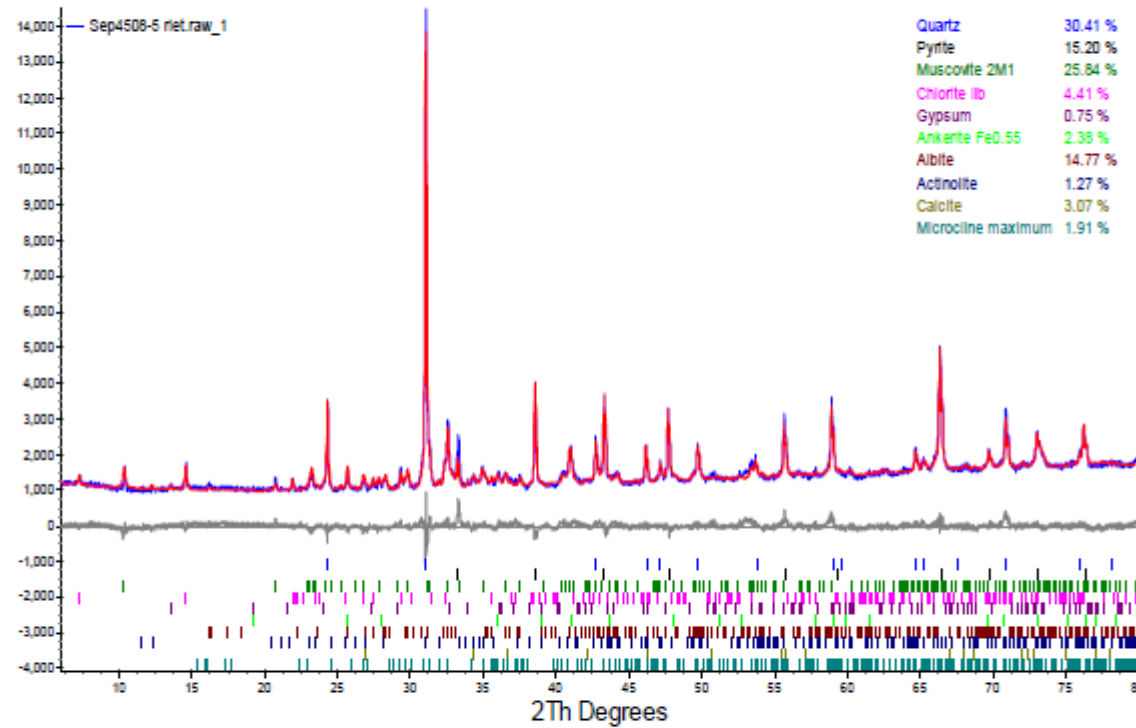
U: 32491





URSTM/UQAT
Custom XRD/M4508-SEP14
09/15/2014

U: 32492

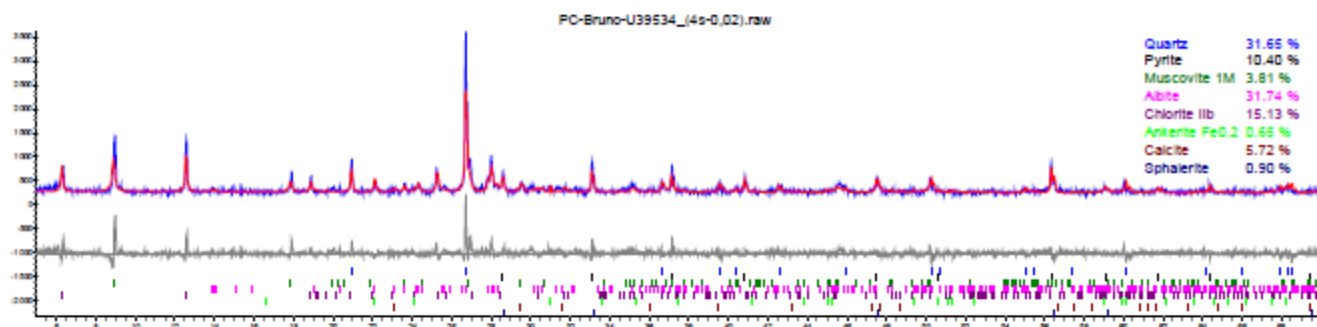


URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PC-Bruno-Bussière
 Préparation : Taha Yassine
 Analyse : Hassan BOUZAHAZAH
 Date : 21 janvier 2015

U39534: MNO Fin égalisé Post essai (RT) 08-2014 L6C14751



La microcline n'a pas été prise en considération dans les 4 échantillons car le logiciel Topaz retourne une teneur de 11 wt.% ce qui semble anormalement élevée.

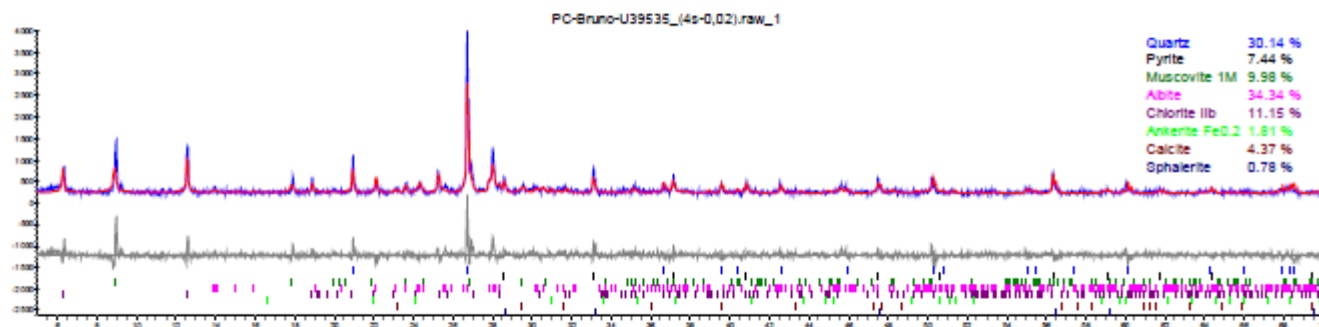
Hassan
 BOUZAHAZAH
 2015.01.21
 12:03:30 -05'00'

Approuvé par : Hassan BOUZAHAZAH, Ph.D (Agent de recherche)

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PC-Bruno-Bussière
 Préparation : Taha Yassine
 Analyse : Hassan BOUZAHAH
 Date : 21 janvier 2015

U39535: MNOF-Gm (RT) 08-2014 L6C14752



Approuvé par : _____
 Hassan BOUZAHAH, Ph.D (Agent de recherche)

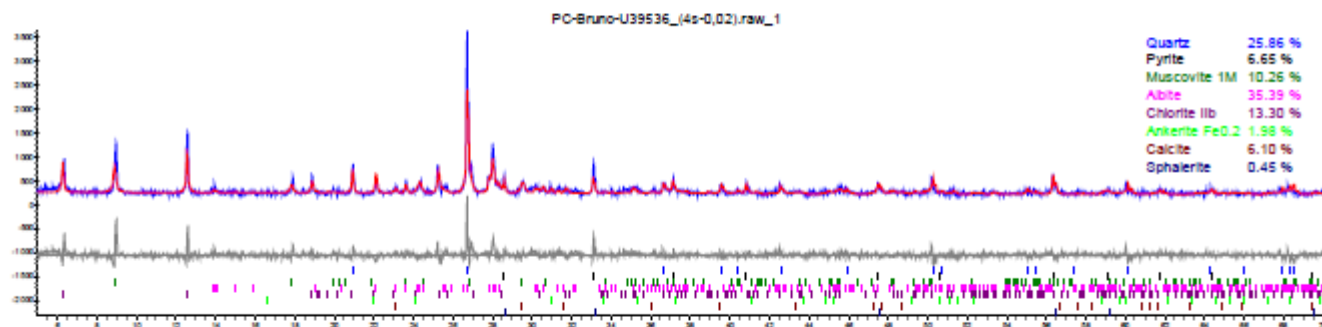


Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PC-Bruno-Bussière
 Préparation : Taha Yassine
 Analyse : Hassan BOUZAHAH
 Date : 21 janvier 2015

U39536: MNOF-Gf (RT) 08-2014 L6C14753



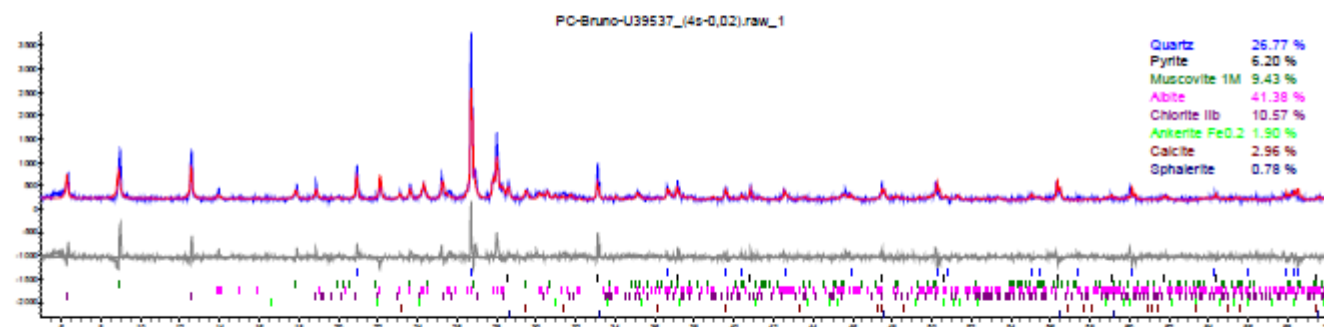
Approuvé par : _____
 Hassan BOUZAHAH, Ph.D (Agent de recherche)

URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PC-Bruno-Bussière
 Préparation : Taha Yassine
 Analyse : Hassan BOUZHACHAH
 Date : 21 janvier 2015

U39537: MNOF-Gg (RT) 08-2014 L6C14754



Hassan
 BOUZHACHAH
 2015.01.21
 12:03:56 -05'00'

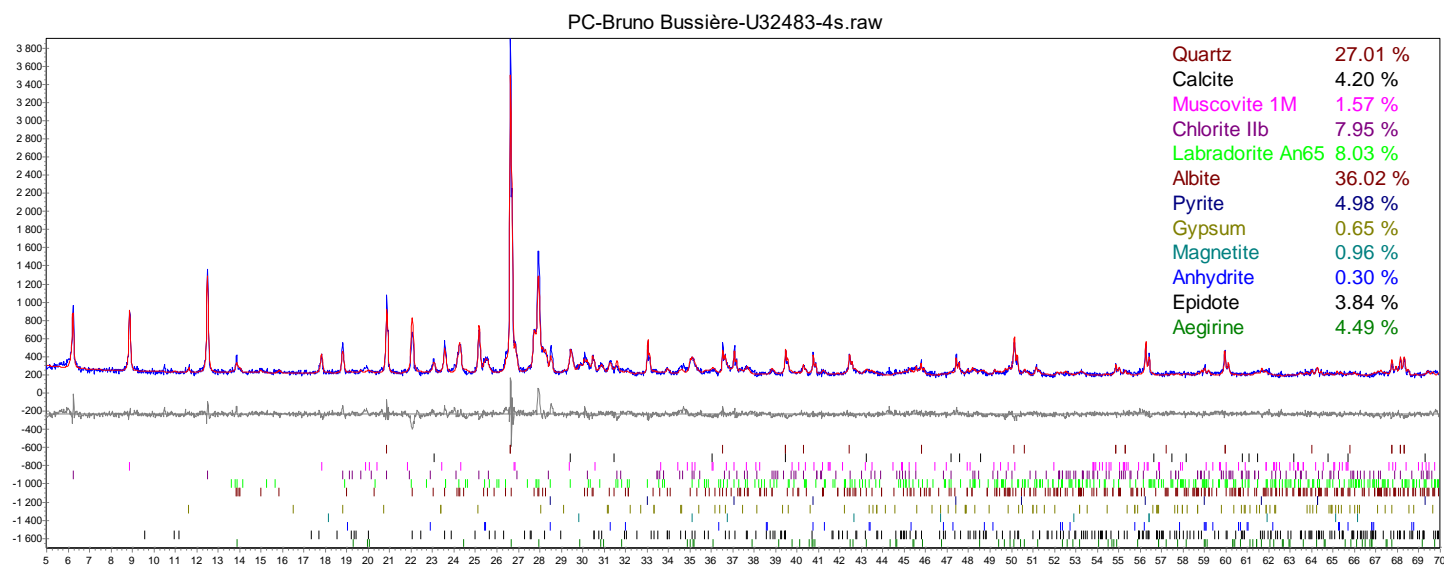
Approuvé par : Hassan BOUZHACHAH, Ph.D (Agent de recherche)

URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PU-2014-02-879
 Préparation : Patrick Bernèche
 Analyse : Hassan BOUZHAAH
 Date : 03 avril 2014

U32483: Manitou 25%



Approuvé par : Hassan BOUZHAAH, Ph.D (Agent de recherche)

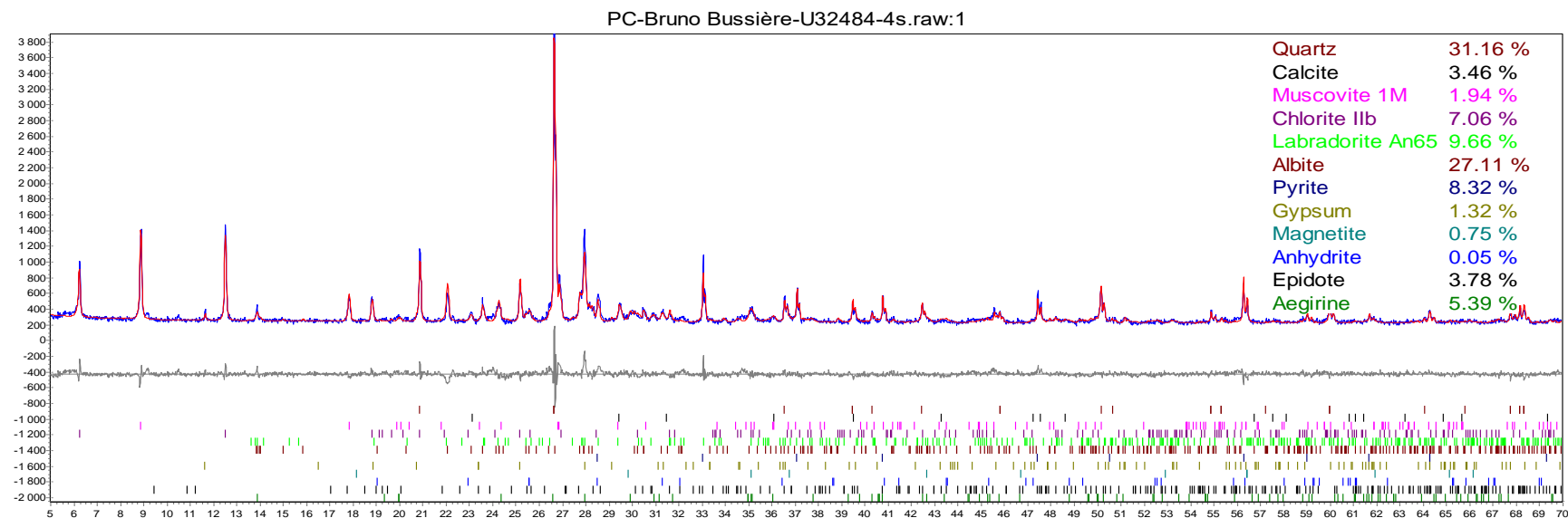


Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PU-2014-02-879
 Préparation : Patrick Bernèche
 Analyse : Hassan BOUZHAAH
 Date : 03 avril 2014

U32484: Manitou 50%



Approuvé par : _____

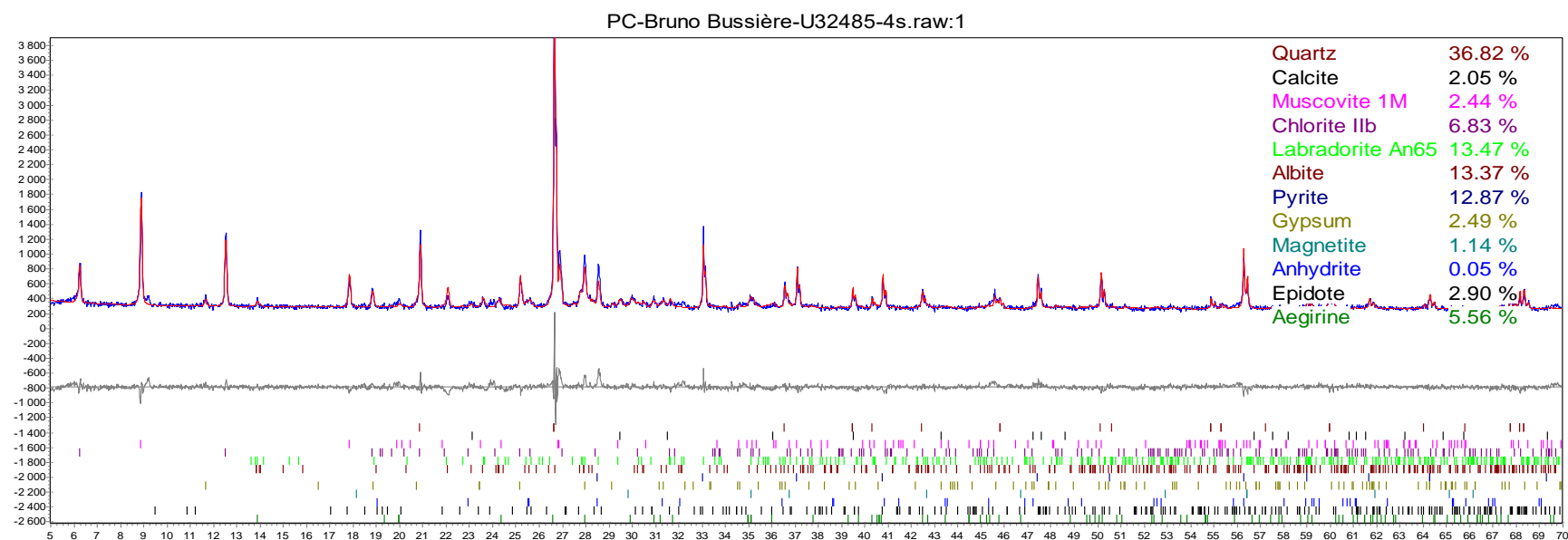
Hassan BOUZHAAH, Ph.D (Agent de recherche)

URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PU-2014-02-879
 Préparation : Patrick Bernèche
 Analyse : Hassan BOUZHAAH
 Date : 03 avril 2014

U32485: Manitou 75%



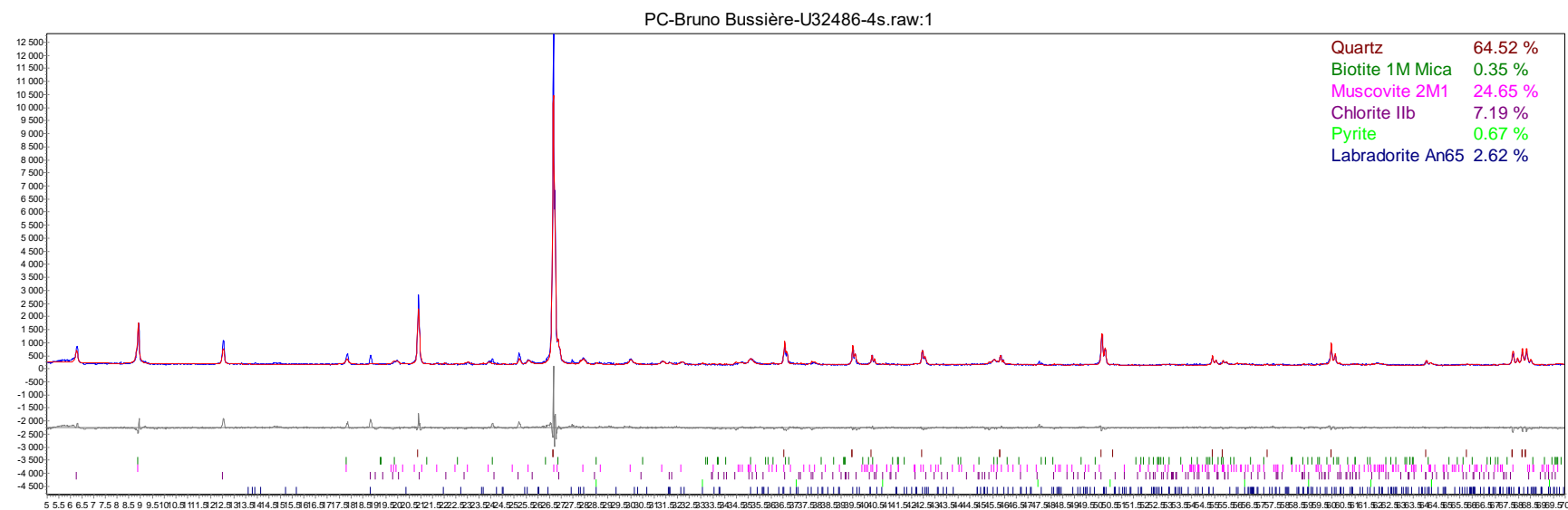
Approuvé par : Hassan BOUZHAAH, Ph.D (Agent de recherche)

URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PU-2014-02-879
 Préparation : Patrick Bernèche
 Analyse : Hassan BOUZHAAH
 Date : 03 avril 2014

U32486: Manitou Oxydé



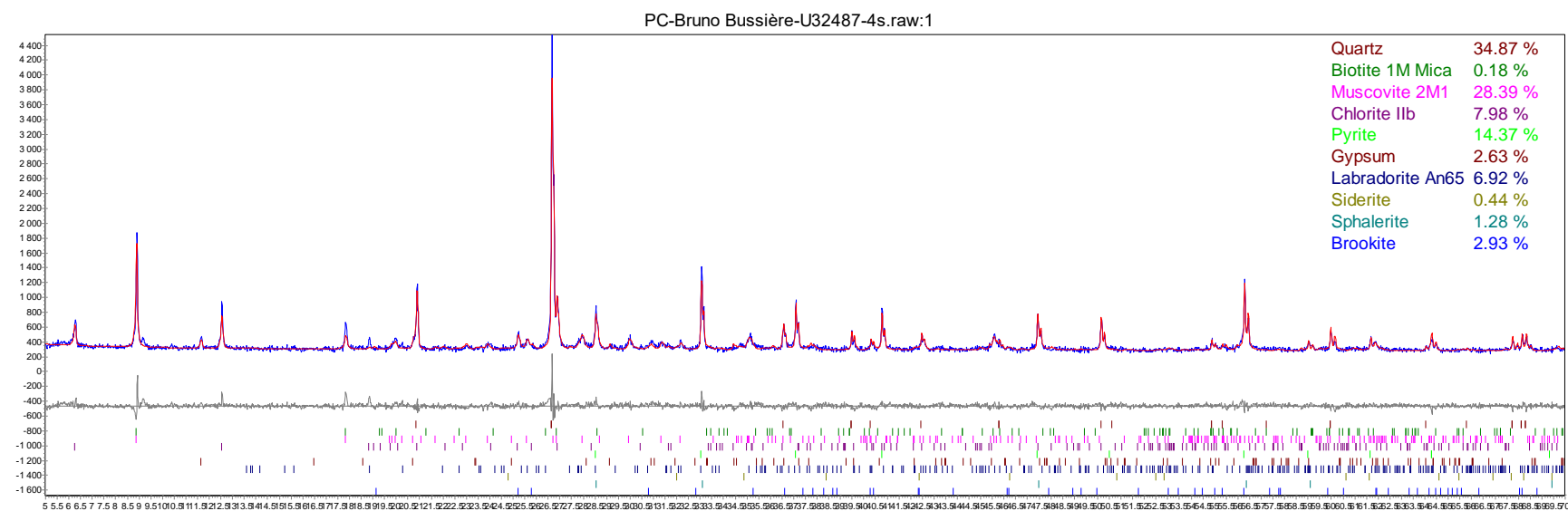
Approuvé par : Hassan BOUZHAAH, Ph.D (Agent de recherche)

URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PU-2014-02-879
 Préparation : Patrick Bernèche
 Analyse : Hassan BOUZHAAH
 Date : 03 avril 2014

U32487 : Manitou non oxydé 1



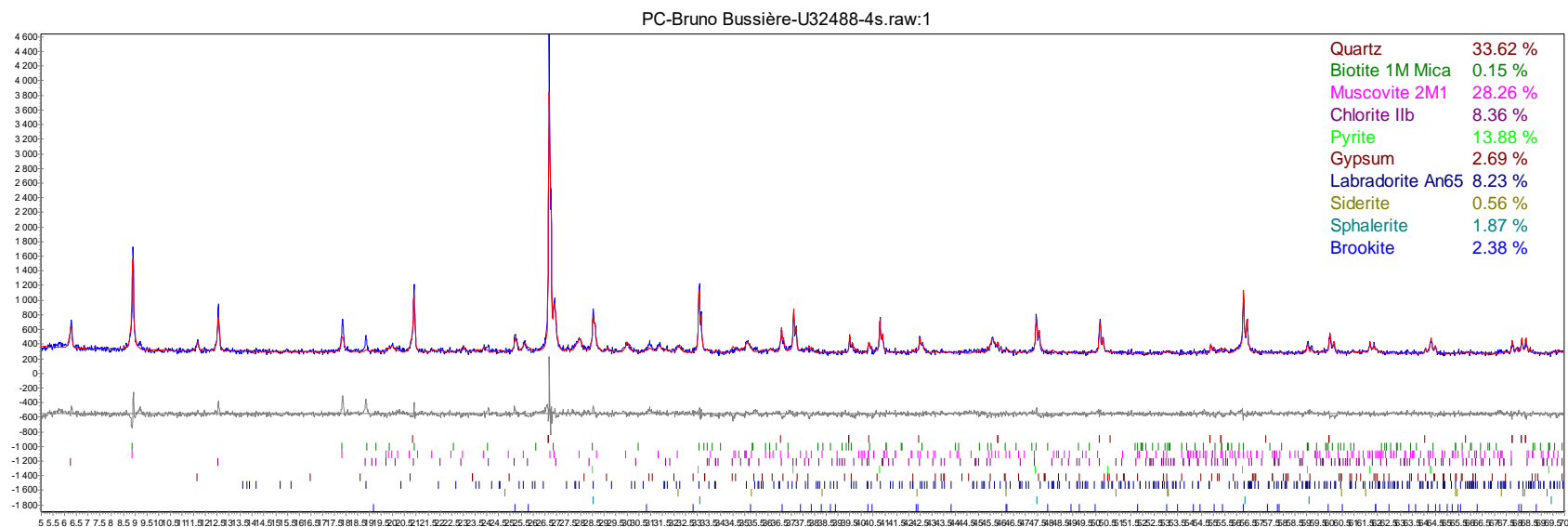
Approuvé par : Hassan BOUZHAAH, Ph.D (Agent de recherche)

URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PU-2014-02-879
 Préparation : Patrick Bernèche
 Analyse : Hassan BOUZAHAH
 Date : 03 avril 2014

U32488 : Manitou non oxydé 2



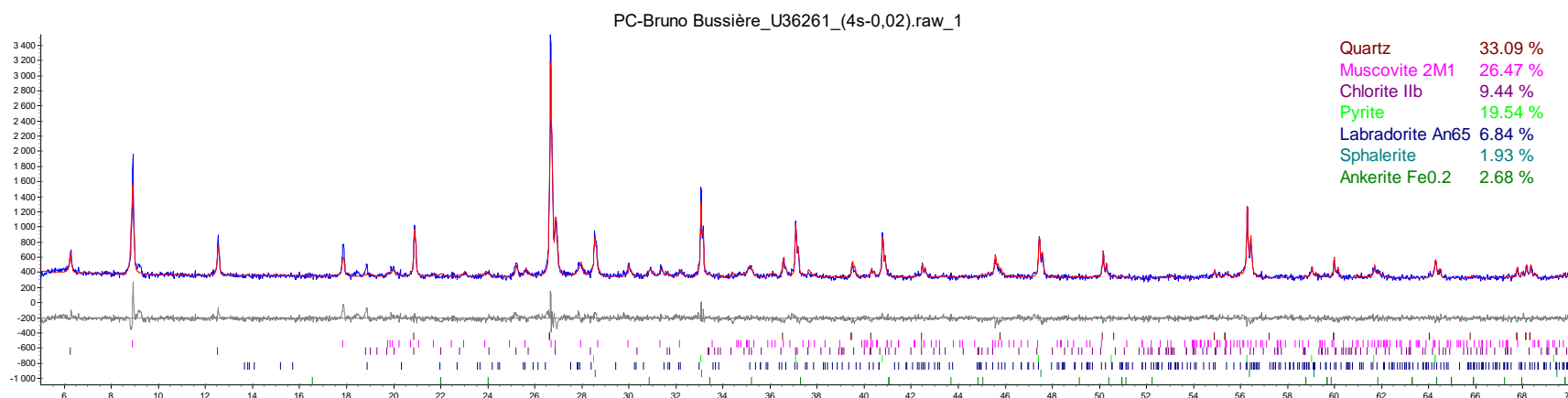
Approuvé par : Hassan BOUZAHAH, Ph.D (Agent de recherche)

URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PU-2014-02-879
 Préparation : Patrick Bernèche
 Analyse : Hassan BOUZHAAH
 Date : 03 avril 2014

U36261: MNO fin RT L6C14602 17/07/2014



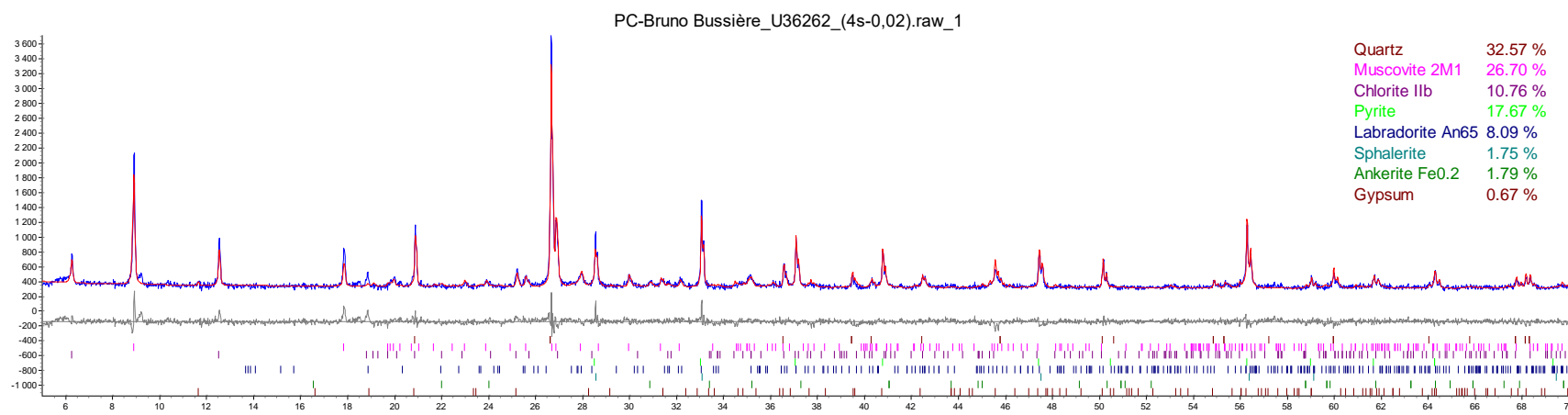
Approuvé par : Hassan BOUZHAAH, Ph.D (Agent de recherche)

URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PU-2014-02-879
 Préparation : Patrick Bernèche
 Analyse : Hassan BOUZHAAH
 Date : 03 avril 2014

U36262: MNO fin RT 08/2014



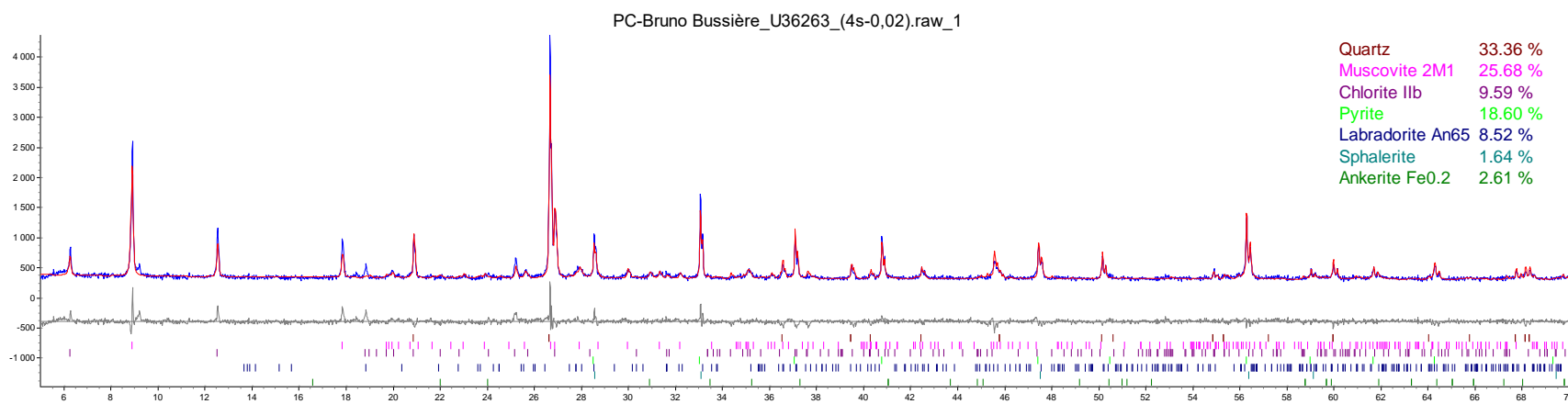
Approuvé par : Hassan BOUZHAAH, Ph.D (Agent de recherche)

URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PU-2014-02-879
 Préparation : Patrick Bernèche
 Analyse : Hassan BOUZAHAH
 Date : 03 avril 2014

U36263: MNO fin RT L6C14701 08/2014 post essai



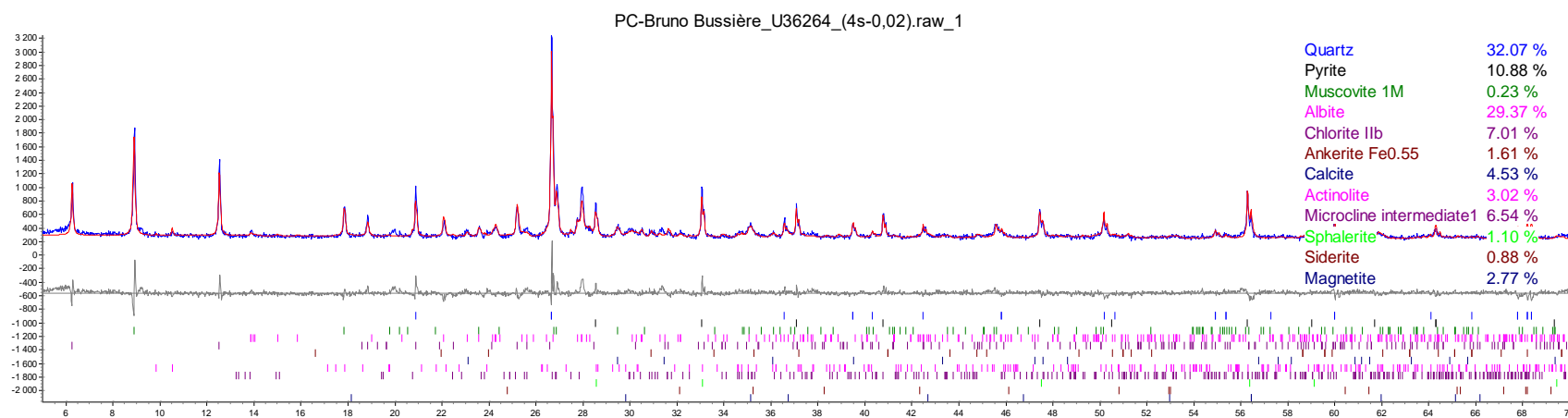
Approuvé par : Hassan BOUZAHAH, Ph.D (Agent de recherche)

URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PU-2014-02-879
 Préparation : Patrick Bernèche
 Analyse : Hassan BOUZAHAH
 Date : 03 avril 2014

U36264: MNO fin égalisé RT L6C14704



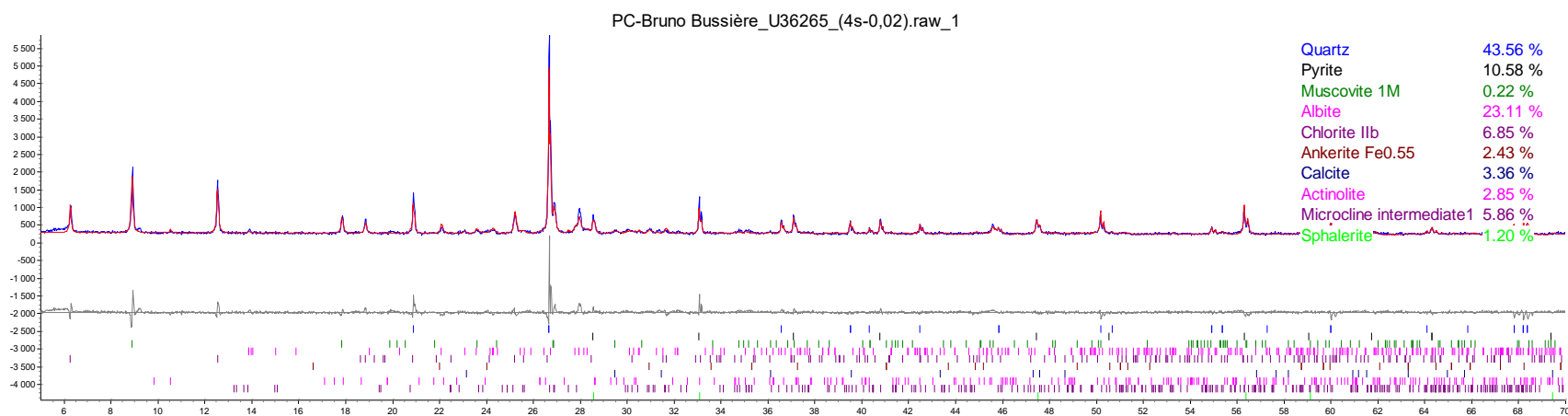
Approuvé par : Hassan BOUZAHAH, Ph.D (Agent de recherche)

URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PU-2014-02-879
 Préparation : Patrick Bernèche
 Analyse : Hassan BOUZAHAH
 Date : 03 avril 2014

U36265 : MNO moyen égalisé RT L6C14703



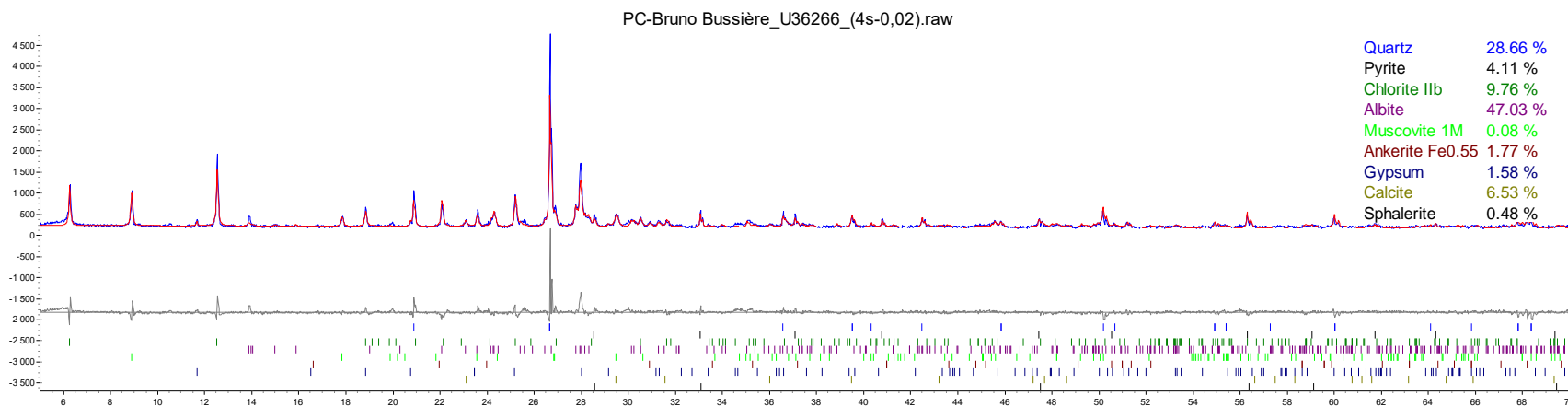
Approuvé par : Hassan BOUZAHAH, Ph.D (Agent de recherche)

URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PU-2014-02-879
 Préparation : Patrick Bernèche
 Analyse : Hassan BOUZHAAH
 Date : 03 avril 2014

U36266 : MNO moyen RT 08/2014 Post essai



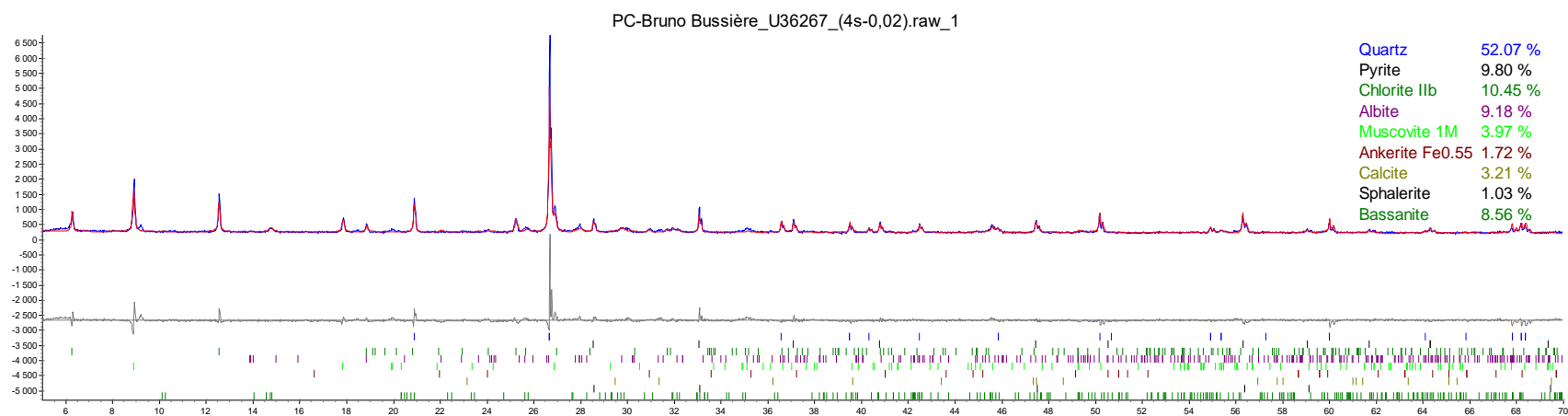
Approuvé par : Hassan BOUZHAAH, Ph.D (Agent de recherche)

URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PU-2014-02-879
 Préparation : Patrick Bernèche
 Analyse : Hassan BOUZAHAH
 Date : 03 avril 2014

U36267 : MNO moyen RT L6C14702 08/2014 Post essai



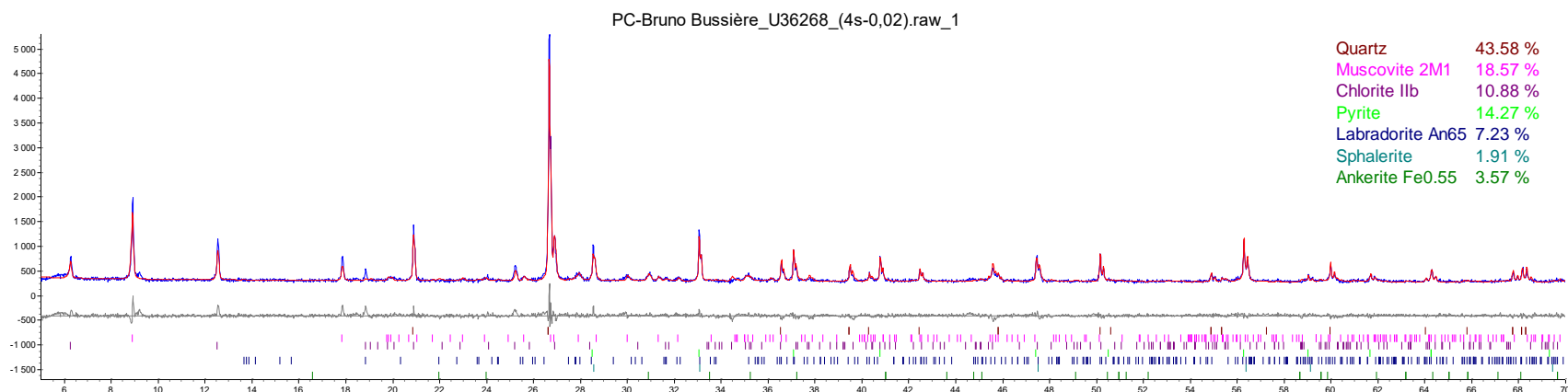
Approuvé par : Hassan BOUZAHAH, Ph.D (Agent de recherche)

URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PU-2014-02-879
 Préparation : Patrick Bernèche
 Analyse : Hassan BOUZHAAH
 Date : 03 avril 2014

U36268 : MNO moyen RT L6C14603 17/07/2014



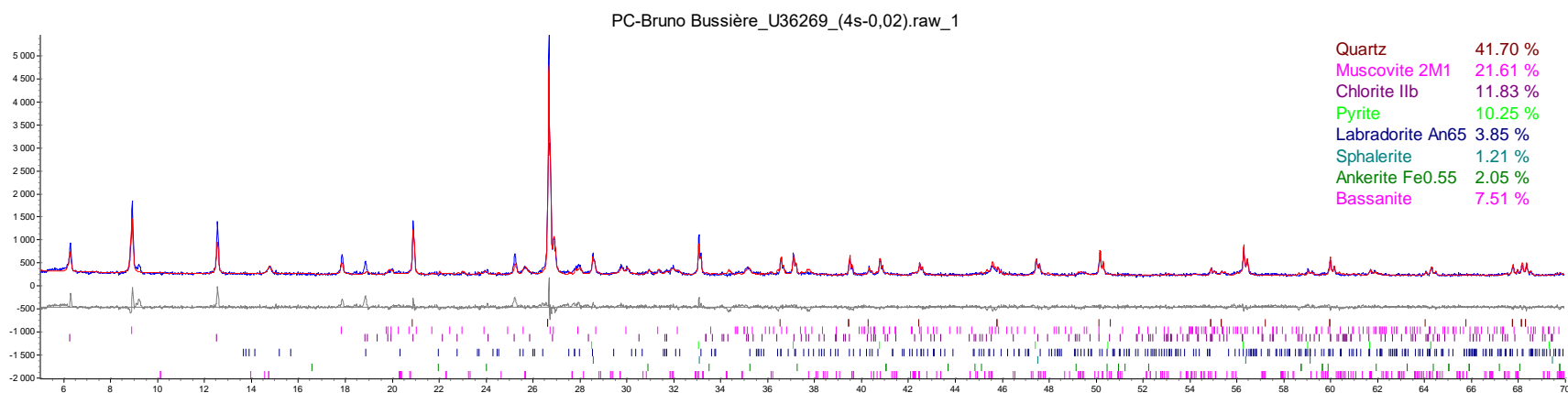
Approuvé par : Hassan BOUZHAAH, Ph.D (Agent de recherche)

URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PU-2014-02-879
 Préparation : Patrick Bernèche
 Analyse : Hassan BOUZAHAH
 Date : 03 avril 2014

U36269 : MNO gros RT L6C14604 17/07/2014



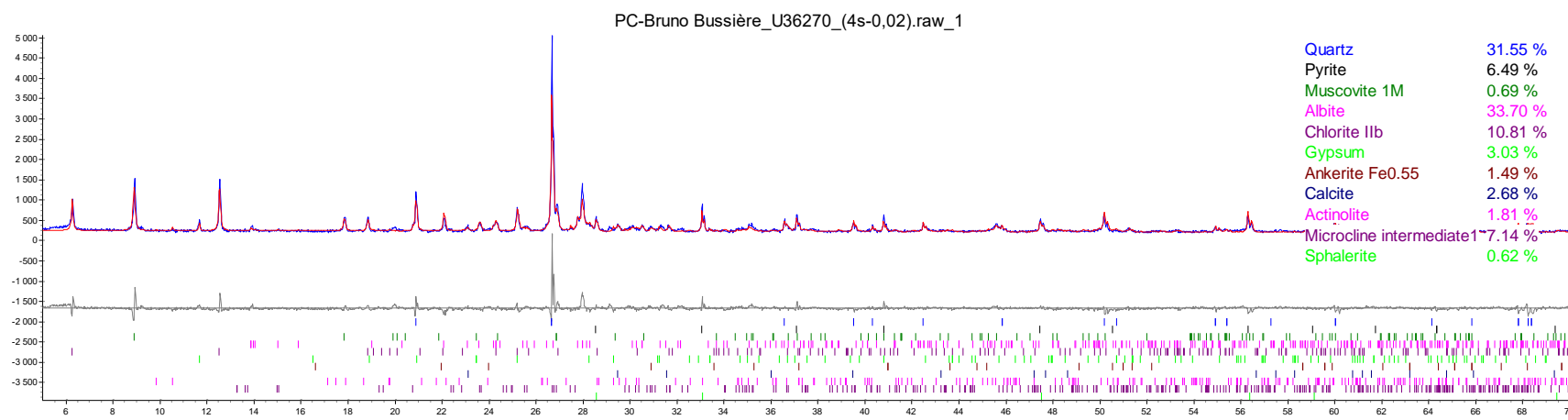
Approuvé par : Hassan BOUZAHAH, Ph.D (Agent de recherche)

URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PU-2014-02-879
 Préparation : Patrick Bernèche
 Analyse : Hassan BOUZHAAH
 Date : 03 avril 2014

U36270 : MNO 50% RT 08/2014 Post essai



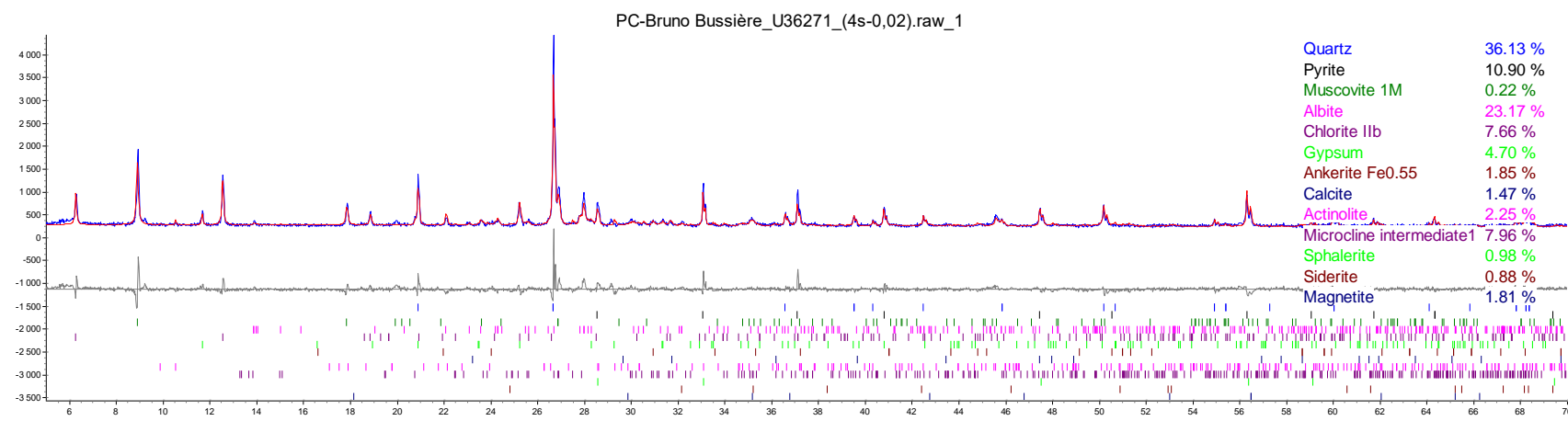
Approuvé par : Hassan BOUZHAAH, Ph.D (Agent de recherche)

URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PU-2014-02-879
 Préparation : Patrick Bernèche
 Analyse : Hassan BOUZHAAH
 Date : 03 avril 2014

U36271 : MNO 75% RT 08/2014 Post essai



Il se peut que la magnetite soit représenté par des oxydes de fer secondaires

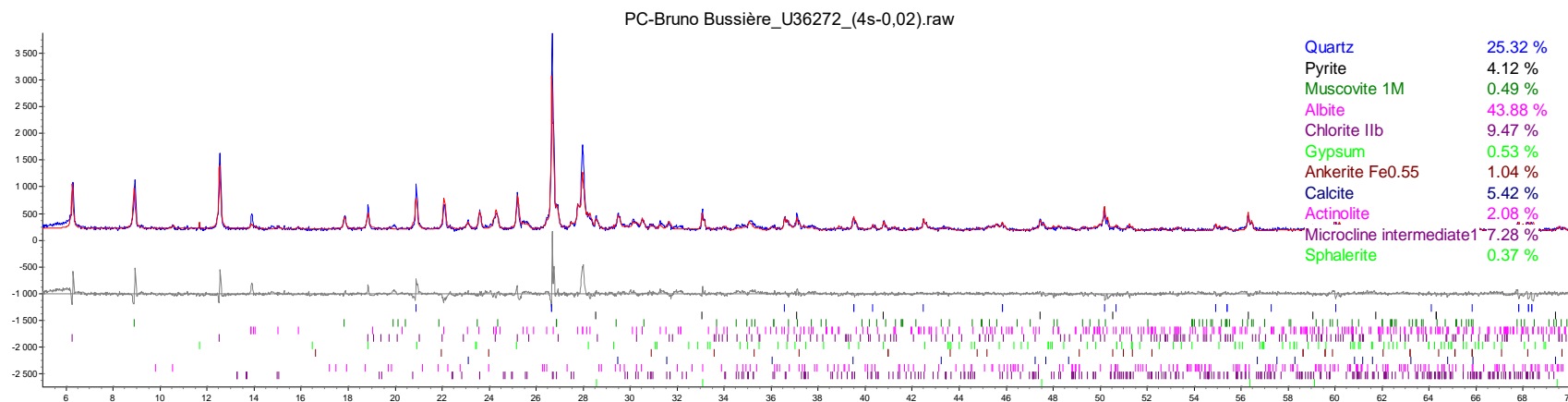
Approuvé par : Hassan BOUZHAAH, Ph.D (Agent de recherche)

URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PU-2014-02-879
 Préparation : Patrick Bernèche
 Analyse : Hassan BOUZHAAH
 Date : 03 avril 2014

U36272 : MNO 25F RT 2014 L6C14611



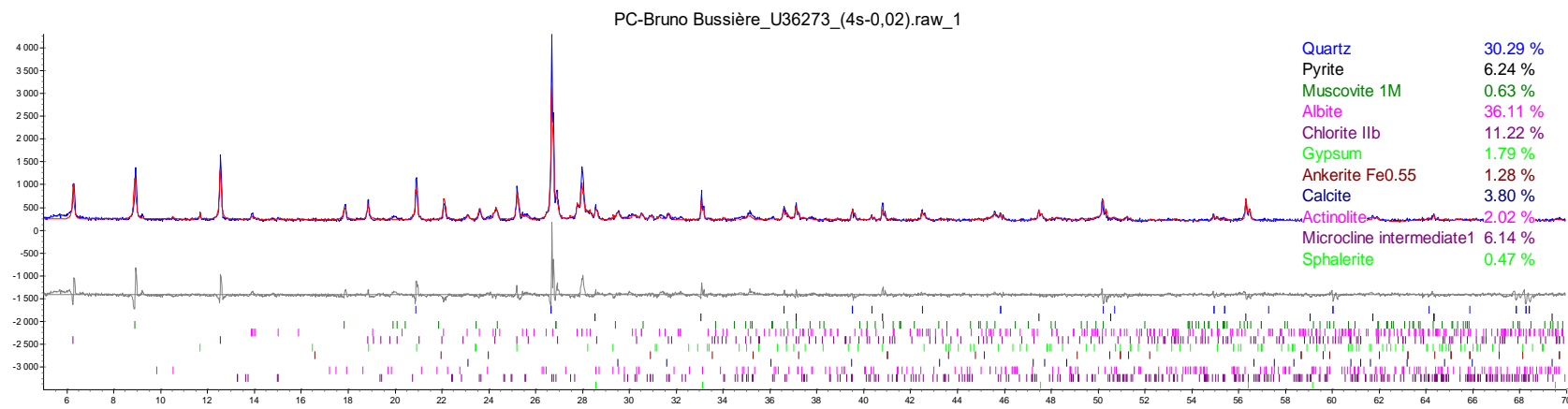
Approuvé par : Hassan BOUZHAAH, Ph.D (Agent de recherche)

URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PU-2014-02-879
 Préparation : Patrick Bernèche
 Analyse : Hassan BOUZHAAH
 Date : 03 avril 2014

U36273 : MNO 50F RT 2014 L6C14613



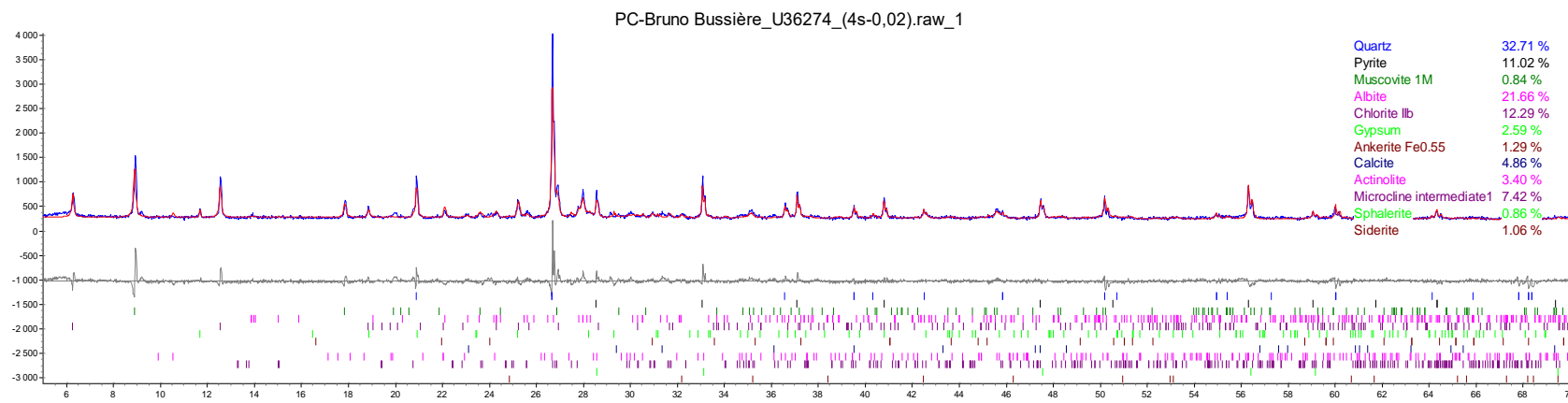
Approuvé par : Hassan BOUZHAAH, Ph.D (Agent de recherche)

URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PU-2014-02-879
 Préparation : Patrick Bernèche
 Analyse : Hassan BOUZHAAH
 Date : 03 avril 2014

U36274 : MNO 75F RT 2014 L6C14615



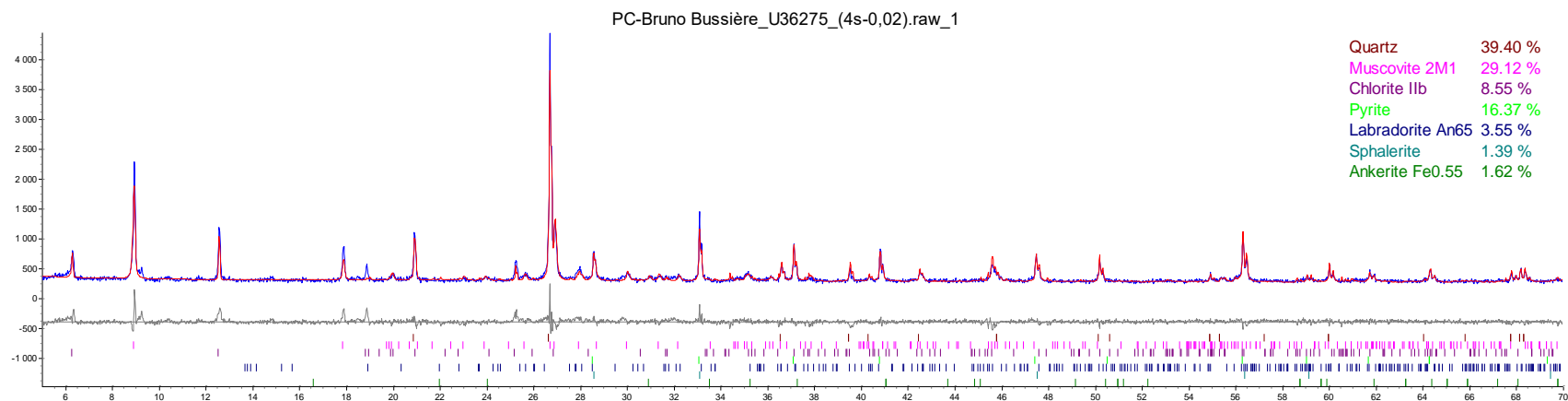
Approuvé par : Hassan BOUZHAAH, Ph.D (Agent de recherche)

URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PU-2014-02-879
 Préparation : Patrick Bernèche
 Analyse : Hassan BOUZHAAH
 Date : 03 avril 2014

U36275: MNO Bis RT L6C14601 17/07/2014



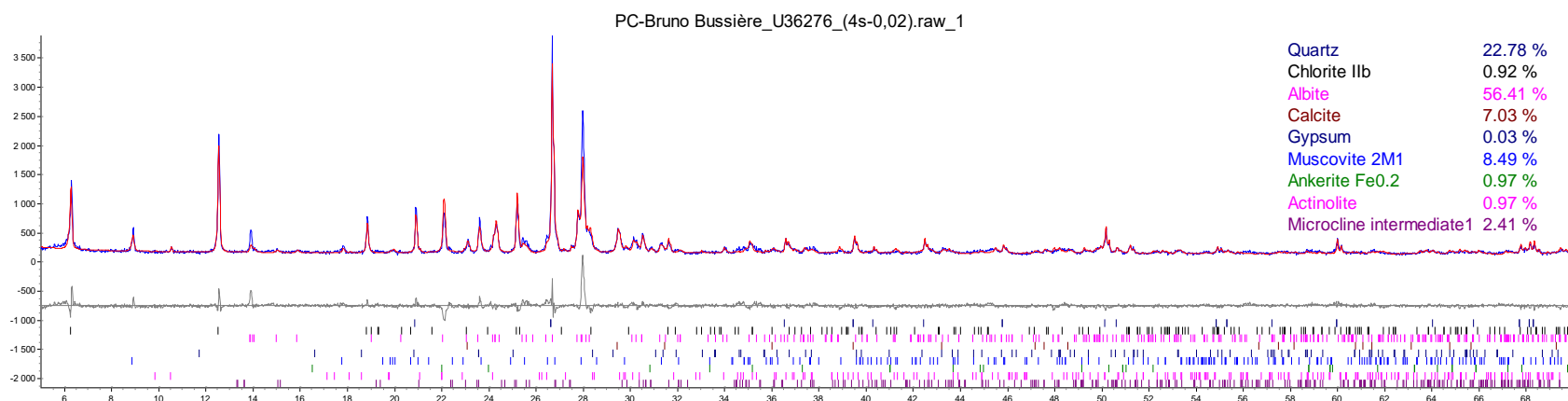
Approuvé par : Hassan BOUZHAAH, Ph.D (Agent de recherche)

URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

Projet : PU-2014-02-879
 Préparation : Patrick Bernèche
 Analyse : Hassan BOUZAHAH
 Date : 03 avril 2014

U36276: Goldex RT 2014 L6C14616



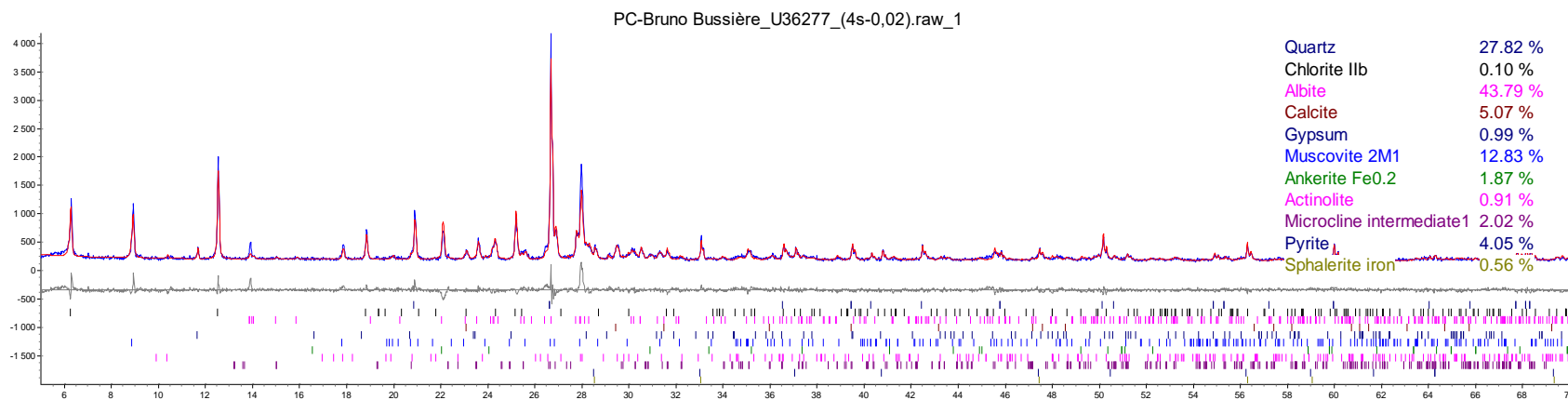
Approuvé par : Hassan BOUZAHAH, Ph.D (Agent de recherche)

URSTM Unité de recherche et de service en technologie minérale
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4
 tél. 819.762.0971 poste 2378-2569 | fax 819.797.6672 | uqat.ca

Analyse minéralogique semi-quantitative par diffraction des rayons X

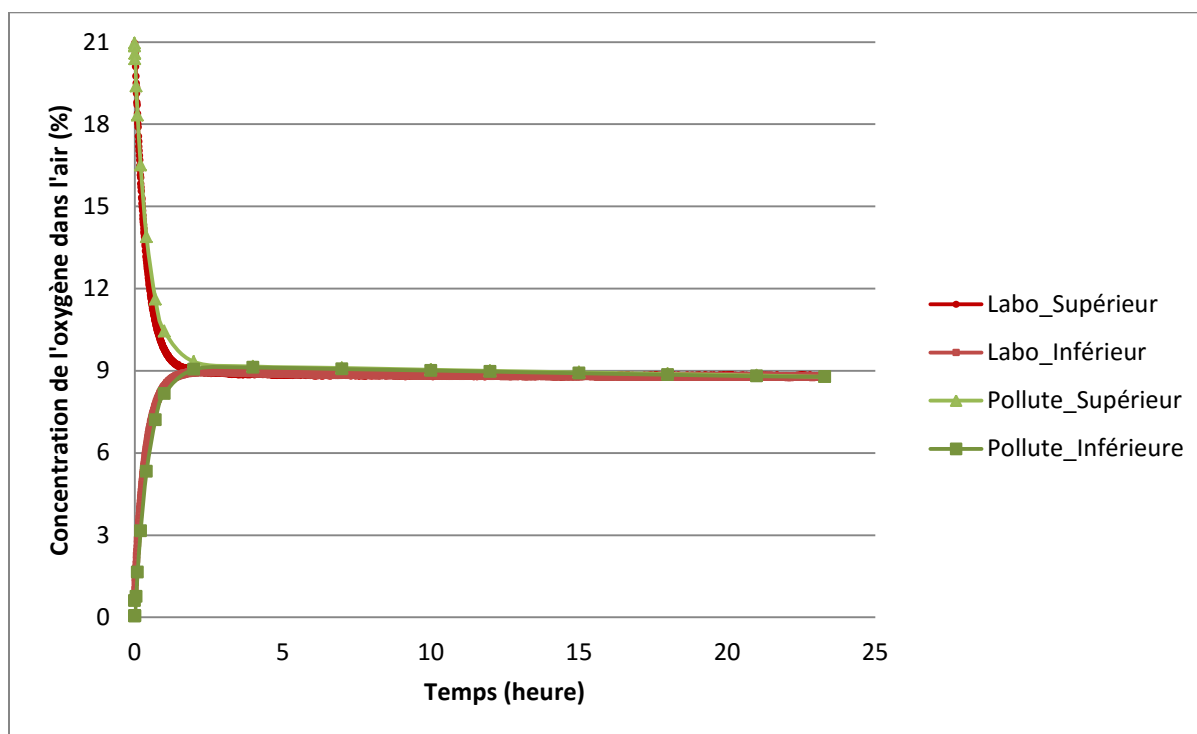
Projet : PU-2014-02-879
 Préparation : Patrick Bernèche
 Analyse : Hassan BOUZHAAH
 Date : 03 avril 2014

U36277: MNO 25% RT 08/2014 Post essai

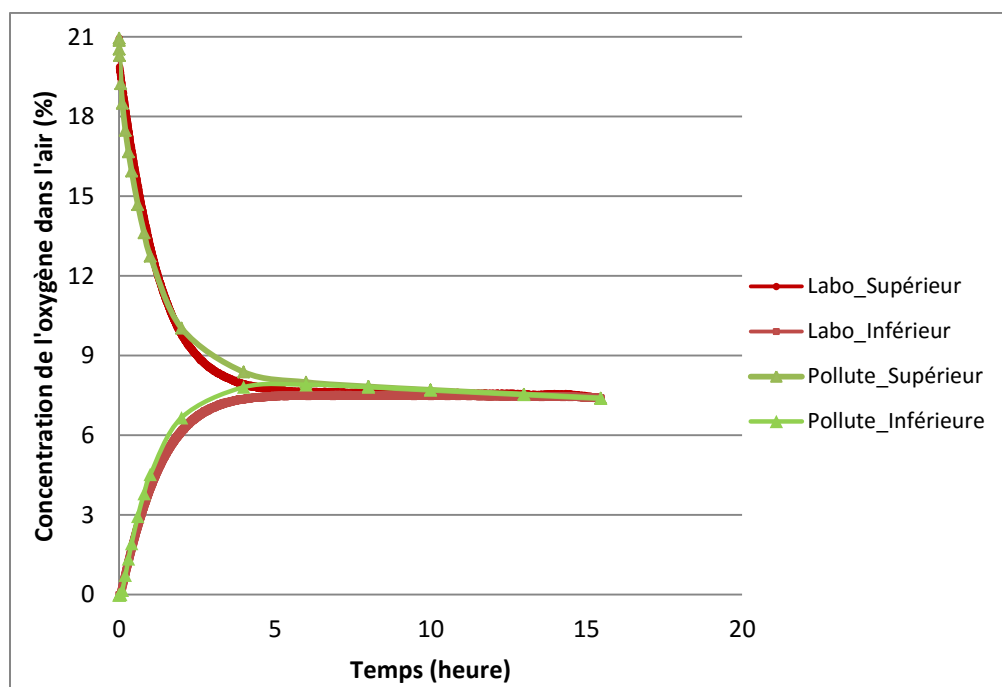


Approuvé par : Hassan BOUZHAAH, Ph.D (Agent de recherche)

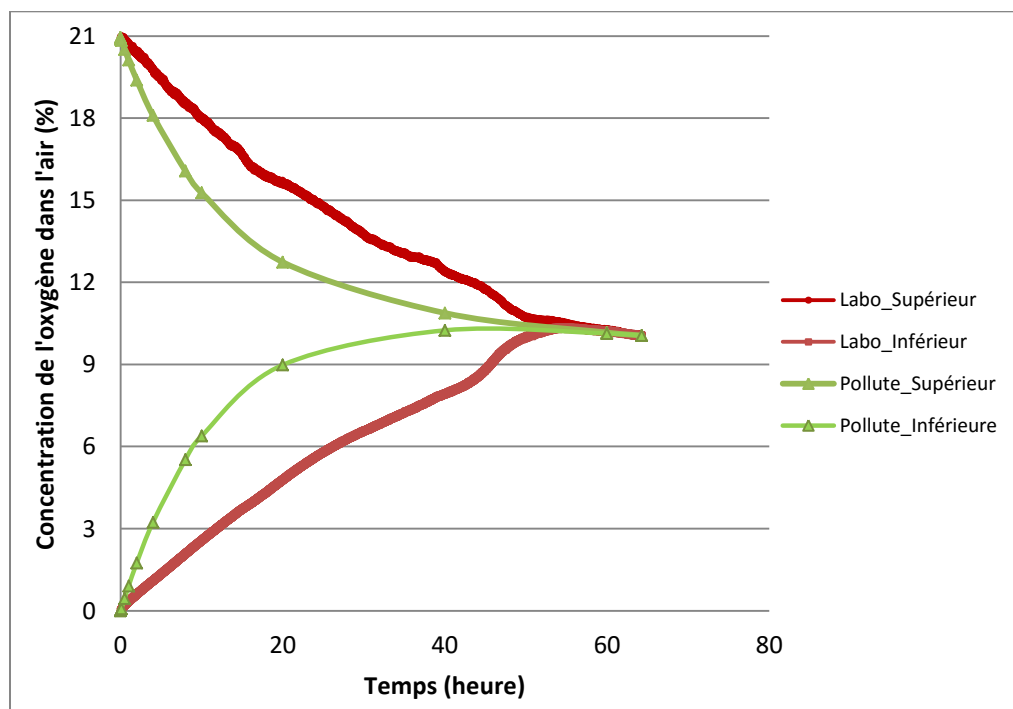
ANNEXE E – RÉSULTATS DES ESSAIS DE DIFFUSION DE L'OXYGÈNE



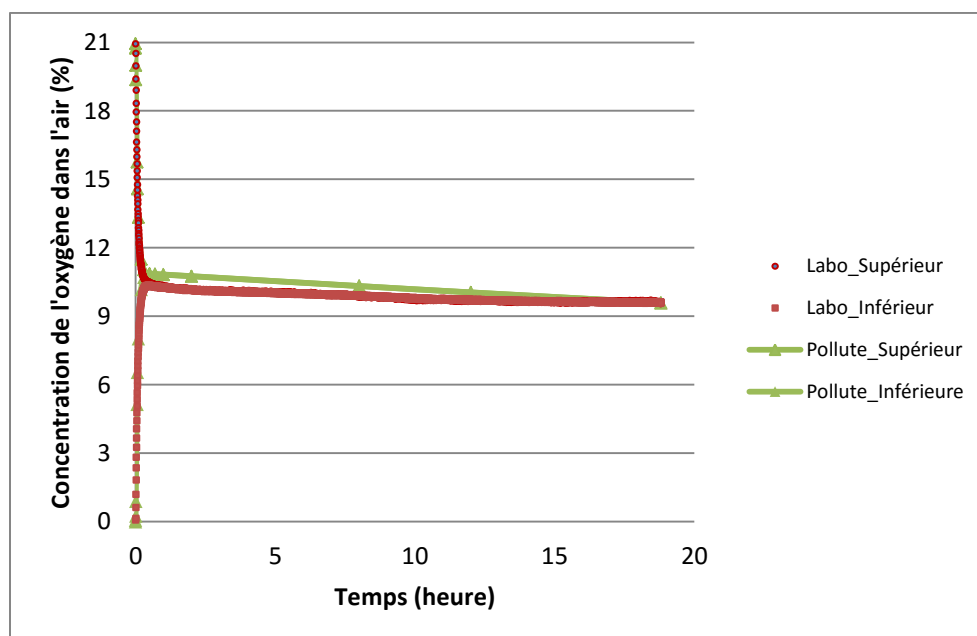
Résultat de l'essai de diffusion de l'oxygène mené sur l'échantillon Goldex avec un degré de saturation (S_r) de 65%



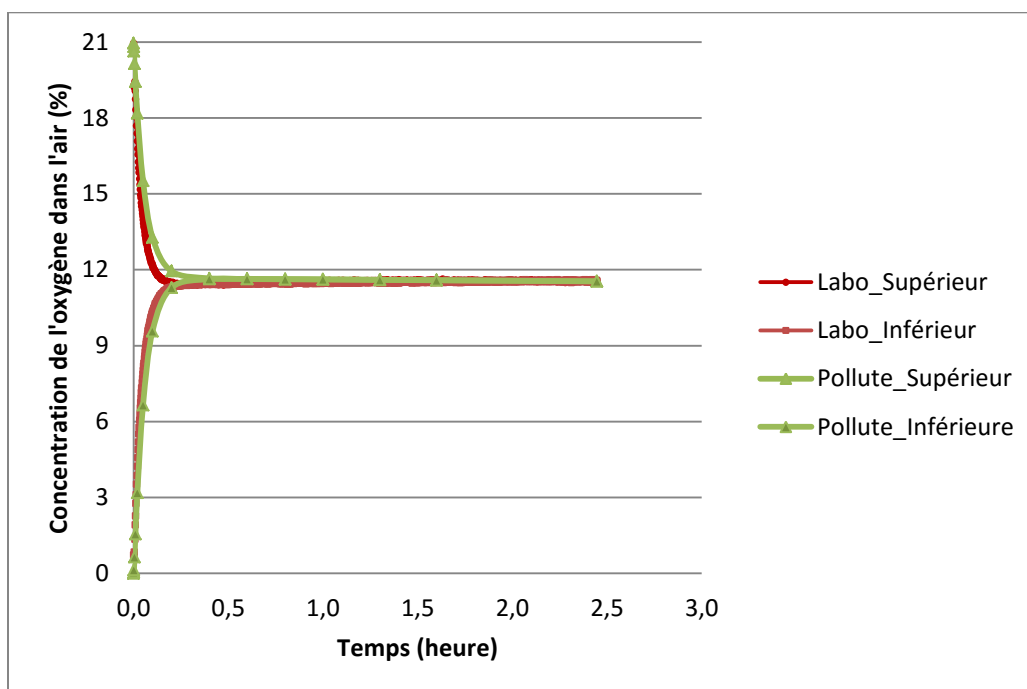
Résultat de l'essai de diffusion de l'oxygène mené sur l'échantillon MNO28 avec un degré de saturation (S_r) de 23%



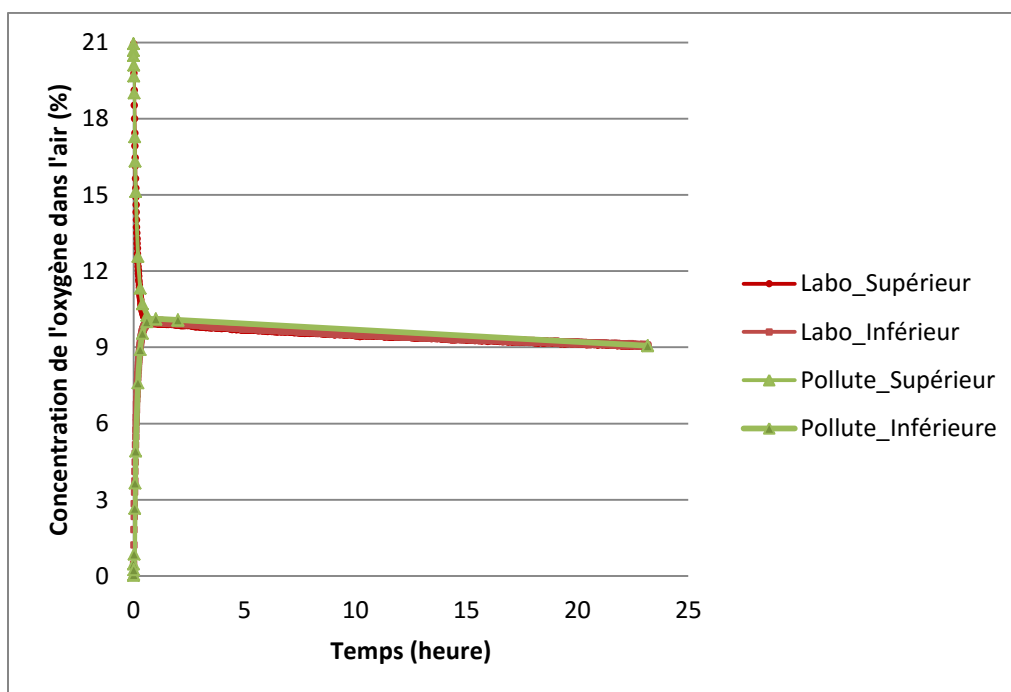
Résultat de l'essai de diffusion de l'oxygène mené sur l'échantillon MNO50 avec un degré de saturation (S_r) de 100%



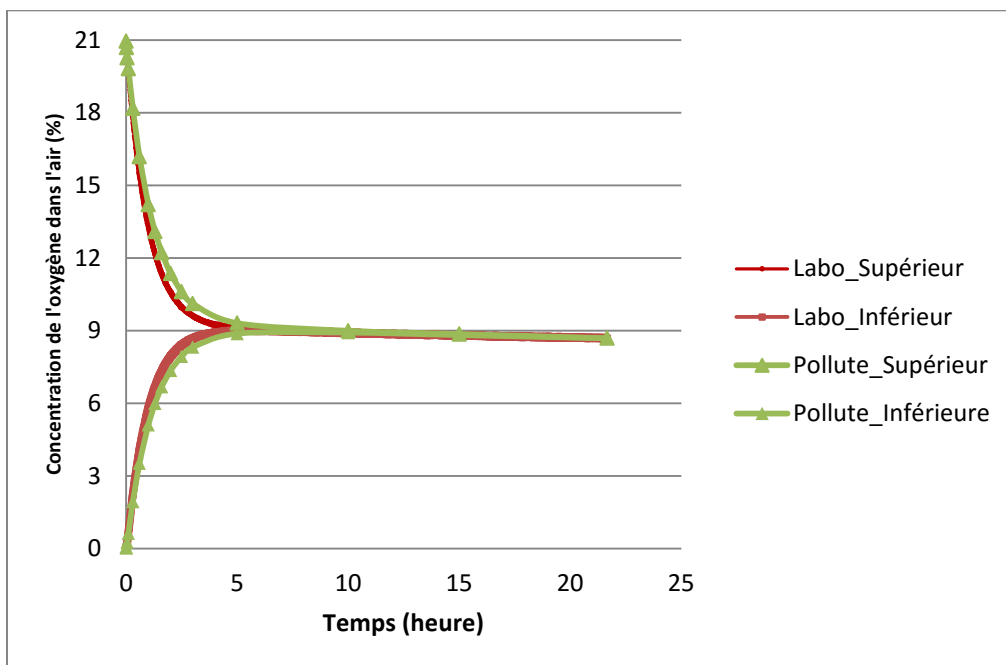
Résultat de l'essai de diffusion de l'oxygène mené sur l'échantillon MNO75 avec un degré de saturation (S_r) de 30%



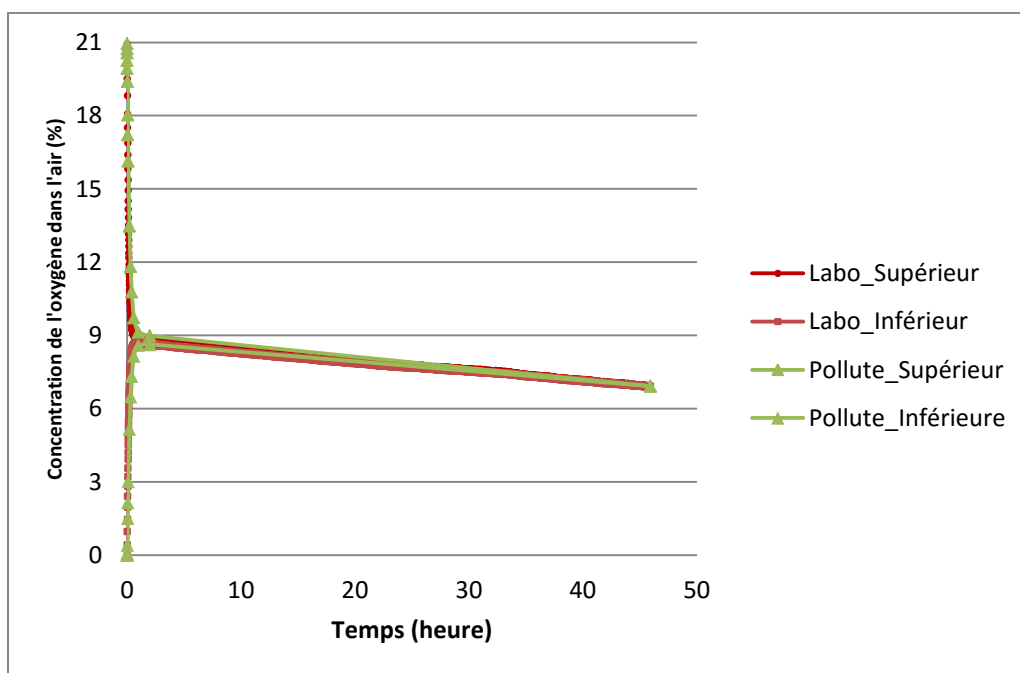
Résultat de l'essai de diffusion de l'oxygène mené sur l'échantillon MNOfin avec un degré de saturation (S_r) de 60%



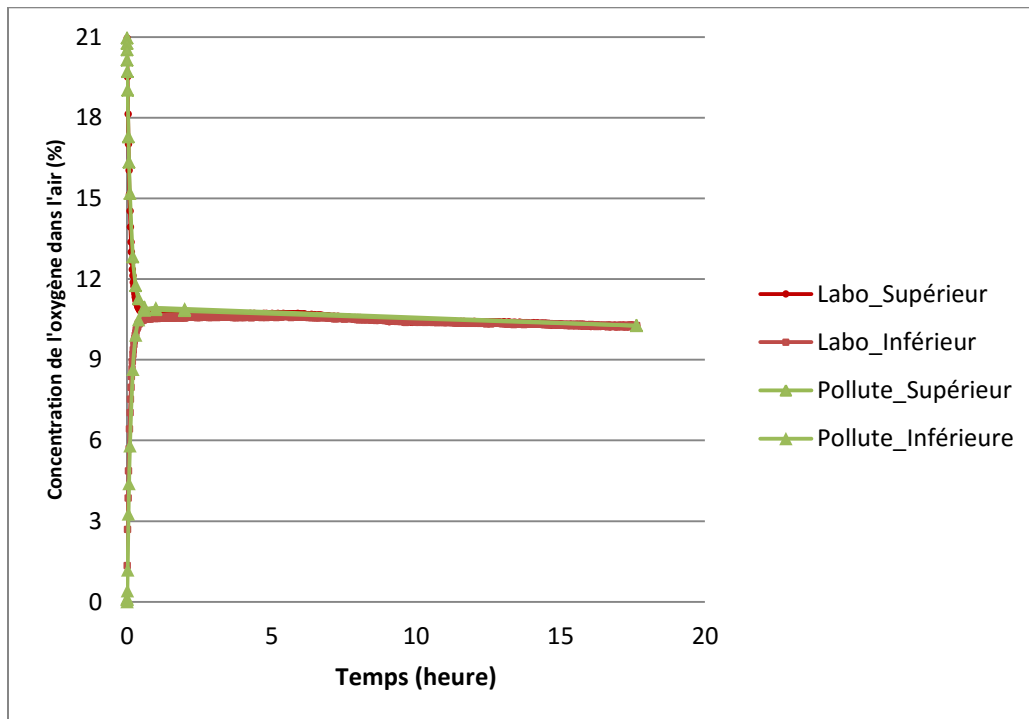
Résultat de l'essai de diffusion de l'oxygène mené sur l'échantillon MNOF-Goldexf avec un degré de saturation (S_r) de 51%



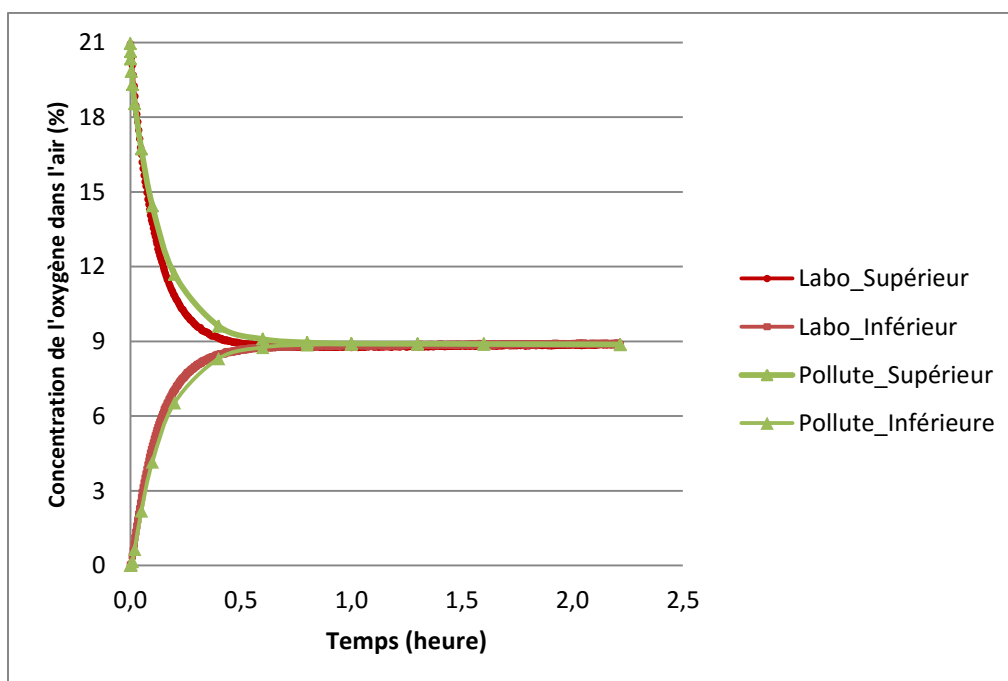
Résultat de l'essai de diffusion de l'oxygène mené sur l'échantillon MNOF-Goldexg avec un degré de saturation (S_r) de 72%



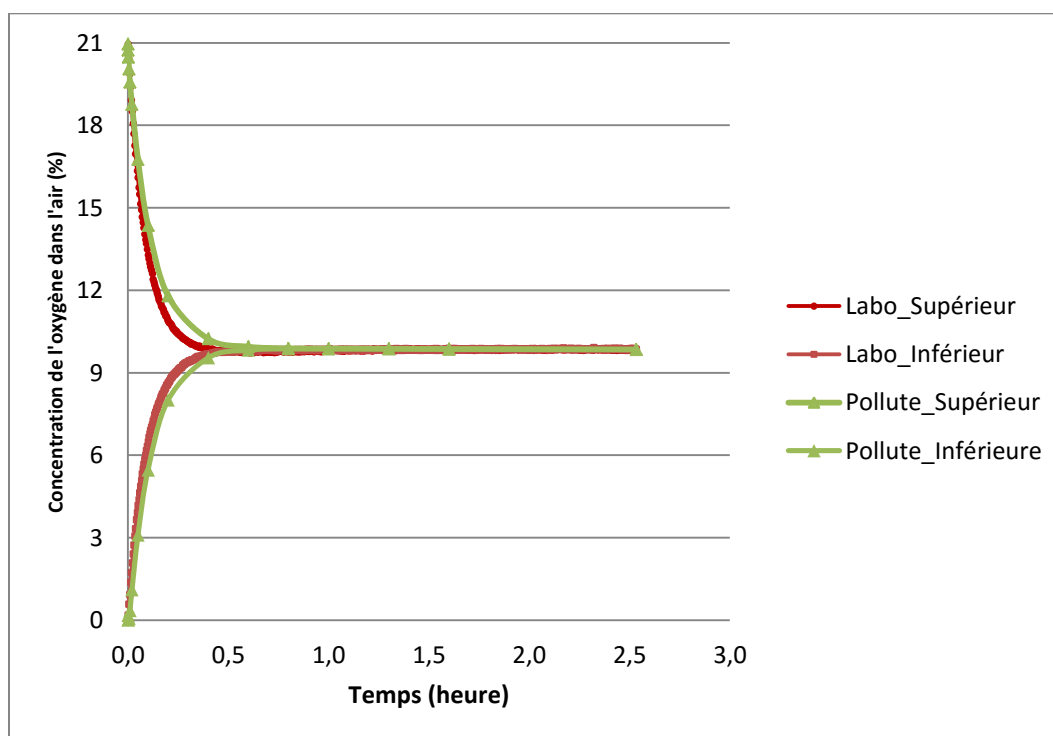
Résultat de l'essai de diffusion de l'oxygène mené sur l'échantillon MNOF-Goldexm avec un degré de saturation (S_r) de 51%



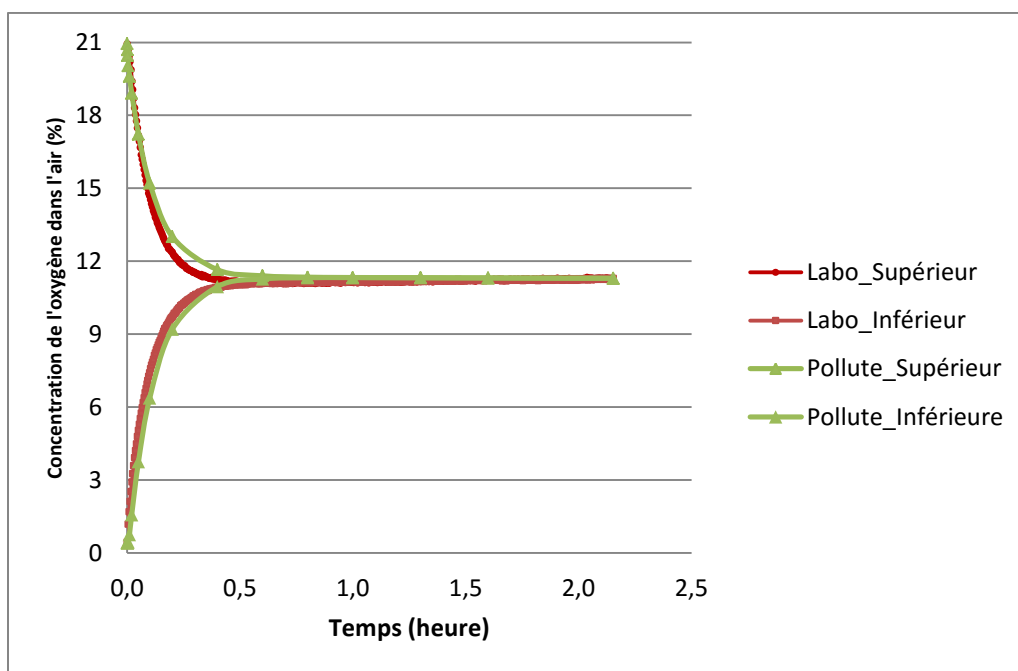
Résultat de l'essai de diffusion de l'oxygène mené sur l'échantillon MNOFin égalisé avec un degré de saturation (S_r) de 39%



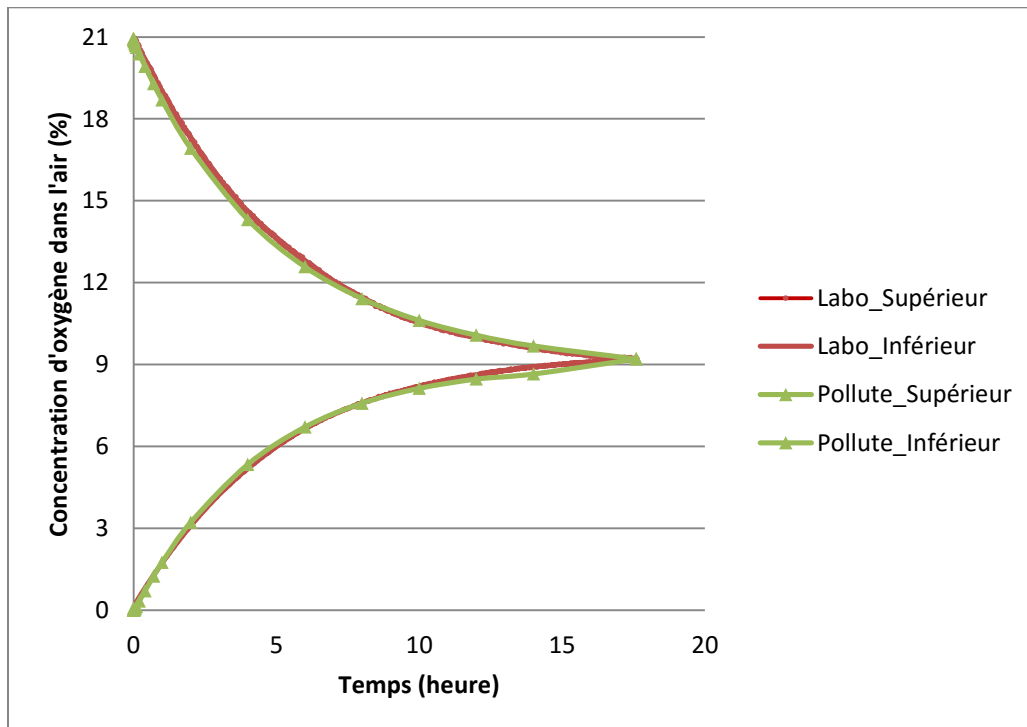
Résultat de l'essai de diffusion de l'oxygène mené sur l'échantillon MNOgros avec un degré de saturation (S_r) de 41%



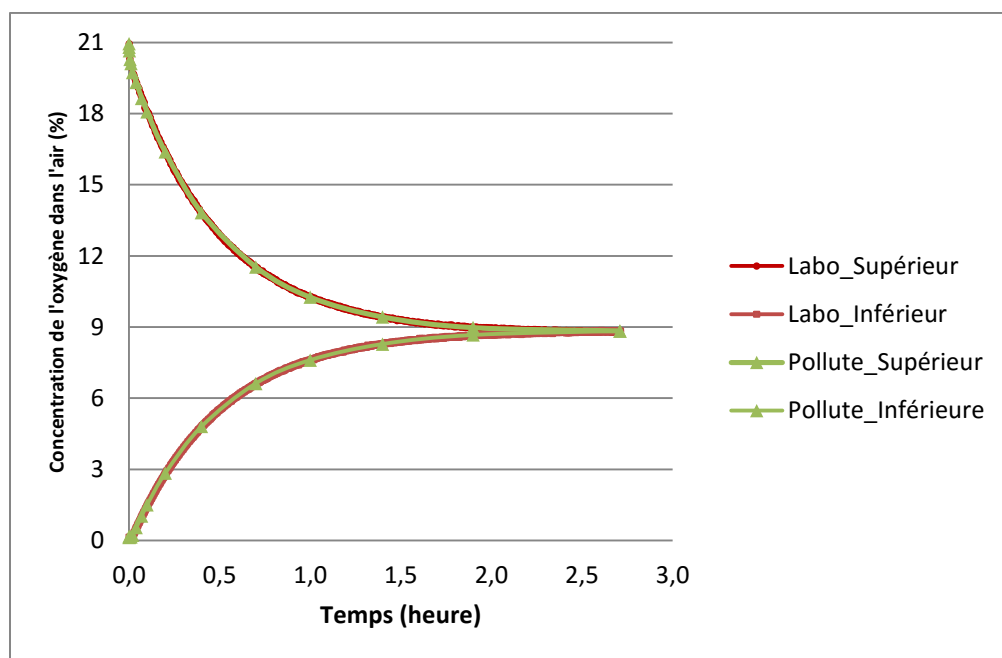
Résultat de l'essai de diffusion de l'oxygène mené sur l'échantillon MNOmoy avec un degré de saturation (S_r) de 40%



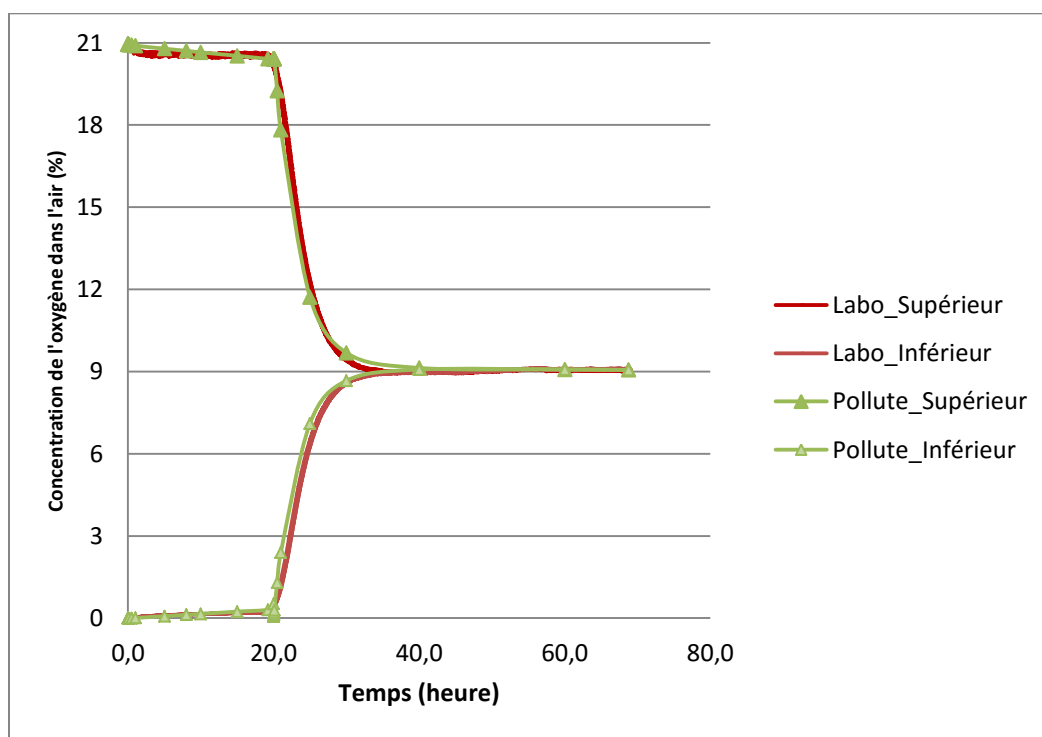
Résultat de l'essai de diffusion de l'oxygène mené sur l'échantillon MNOMoy égalisé avec un degré de saturation (S_r) de 42%



Résultat de l'essai de diffusion de l'oxygène mené sur l'échantillon MNO sat avec un degré de saturation (S_r) de 92%

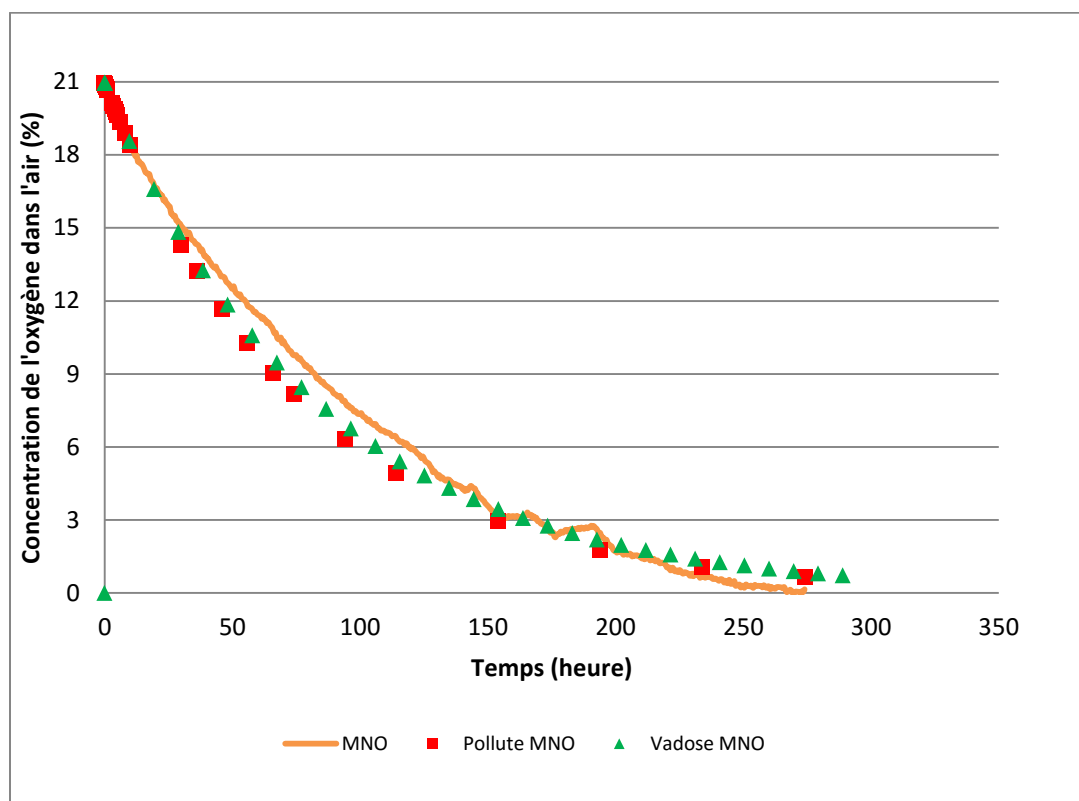


Résultat de l'essai de diffusion de l'oxygène mené sur l'échantillon MO avec un degré de saturation (S_r) de 65%

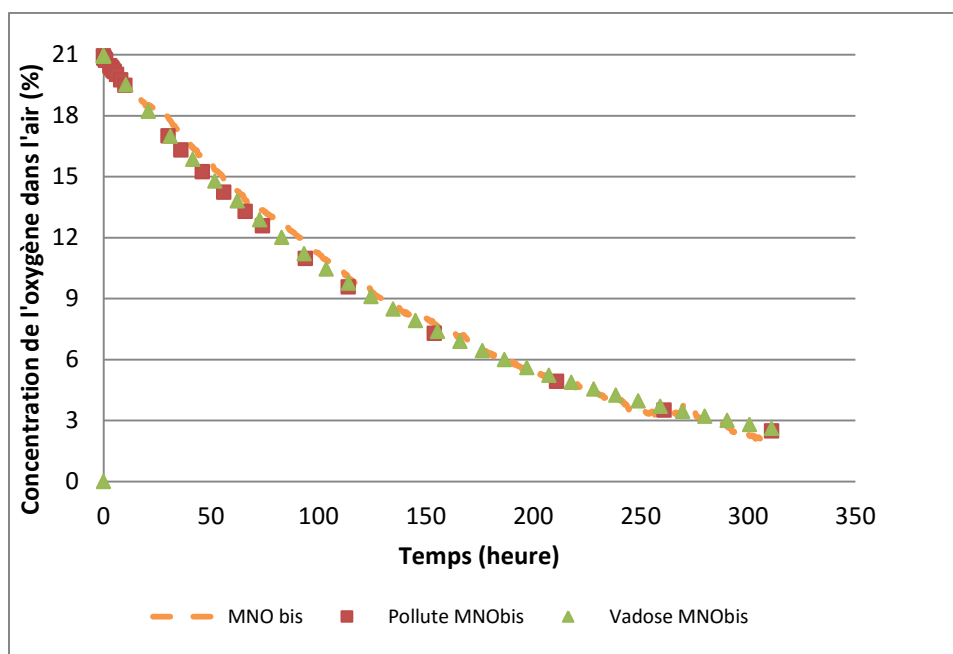


Résultat de l'essai de diffusion de l'oxygène mené sur l'échantillon MO sat avec un degré de saturation (S_r) de 92%

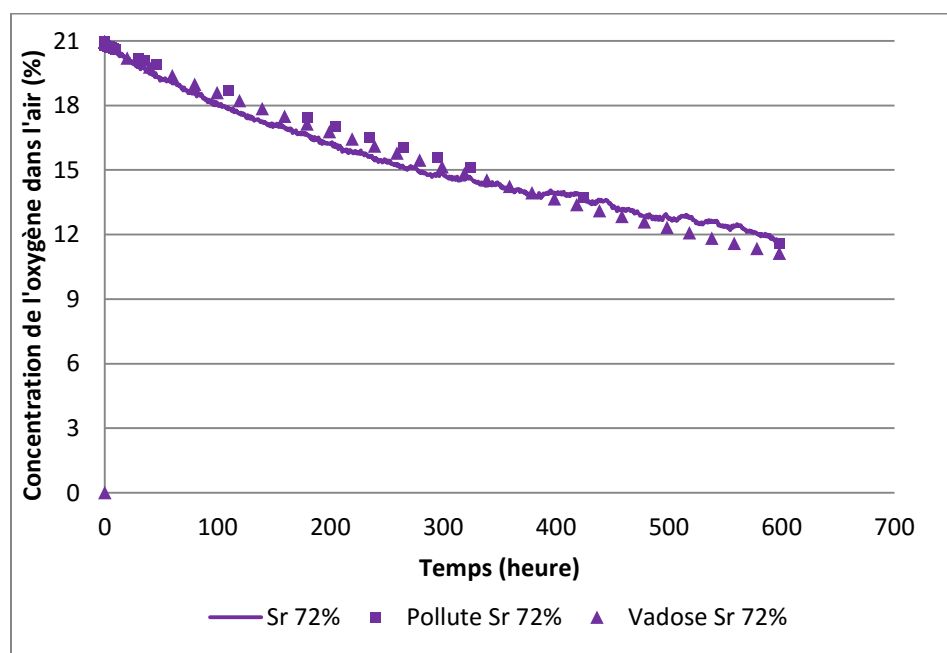
ANNEXE F –RÉSULTATS DES ESSAIS DE CONSOMMATION DE L'OXYGÈNE



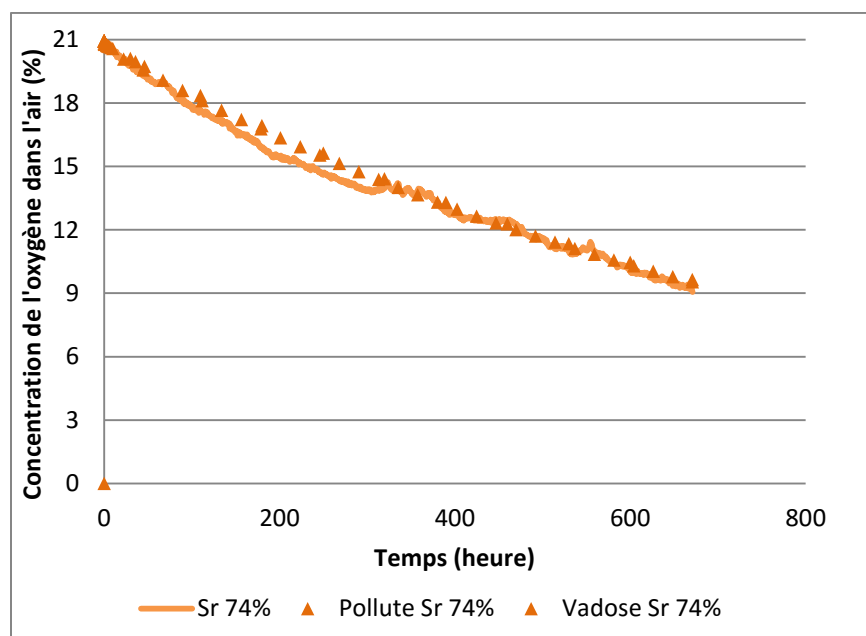
Résultats de l'essai de consommation de l'oxygène sur le résidu MNO ($S_r = 44\%$; valeurs déduites de $D_e = 30 \text{ m}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ et $K_r = 386,9 \text{ an}^{-1}$) et valeurs de la concentration d'oxygène obtenues des simulations réalisées avec POLLUTE et Vadose/W



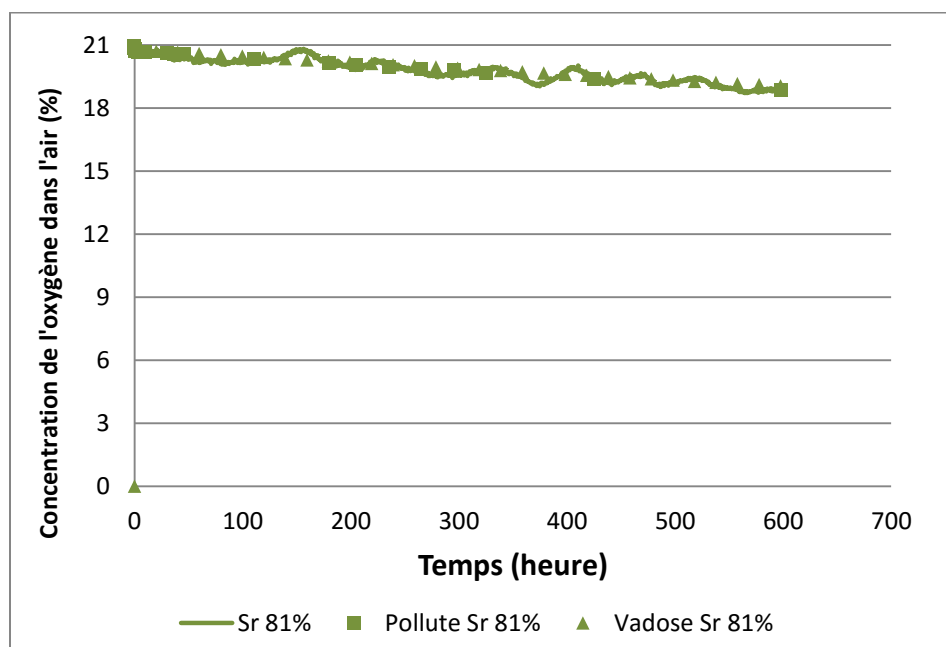
Résultats de l'essai de consommation de l'oxygène sur le résidu MNO Juin ($S_r = 28\%$; valeurs déduites de $D_e = 83 \text{ m}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ et $K_r = 318,5 \text{ an}^{-1}$) et valeurs de la concentration d'oxygène obtenues des simulations réalisées avec POLLUTE et Vadose/W



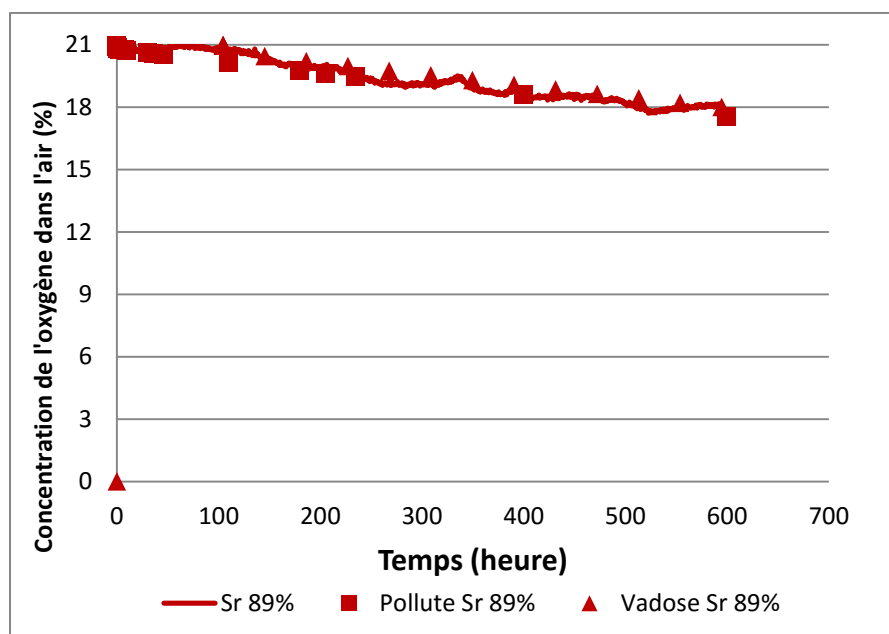
Résultats de l'essai de consommation de l'oxygène sur le résidu MNO sat2 ($S_r = 72\%$; valeurs déduites de $D_e = 3,7 \text{ m}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ et $K_r = 32,4 \text{ an}^{-1}$) et valeurs de la concentration d'oxygène obtenues des simulations réalisées avec POLLUTE et Vadose/W



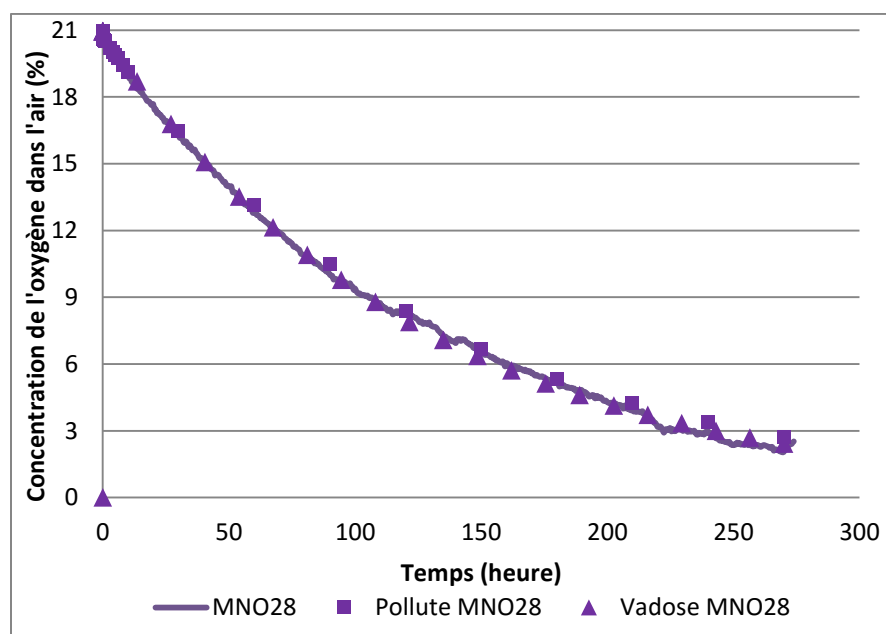
Résultats de l'essai de consommation de l'oxygène sur le résidu MNO sat3 (Sr = 74% ; valeurs déduites de $D_e = 3,7 \text{ m}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ et $K_r = 28,5 \text{ an}^{-1}$) et valeurs de la concentration d'oxygène obtenues des simulations réalisées avec POLLUTE et Vadose/W



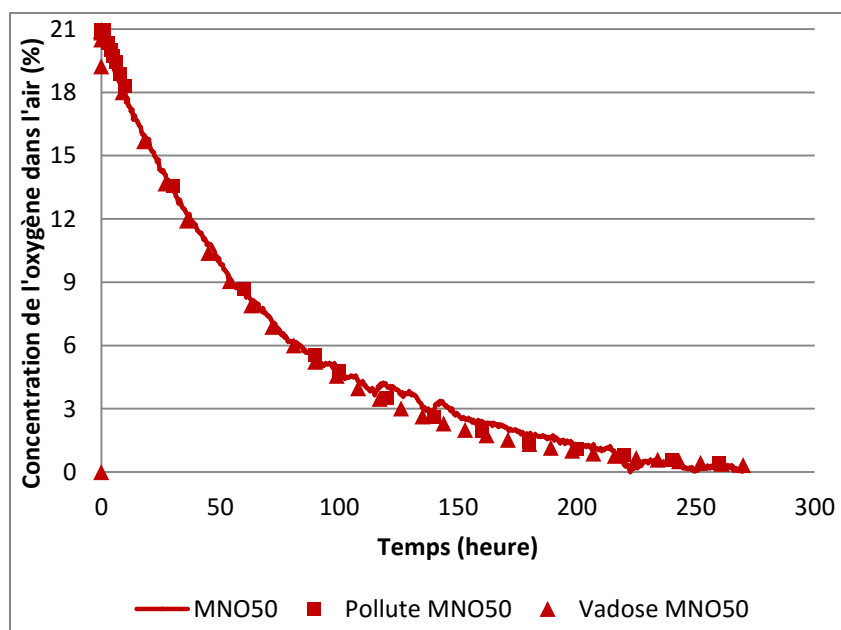
Résultats de l'essai de consommation de l'oxygène sur le résidu MO sat2 (Sr = 74% ; valeurs déduites de $D_e = 0,2 \text{ m}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ et $K_r = 14,5 \text{ an}^{-1}$) et valeurs de la concentration d'oxygène obtenues des simulations réalisées avec POLLUTE et Vadose/W



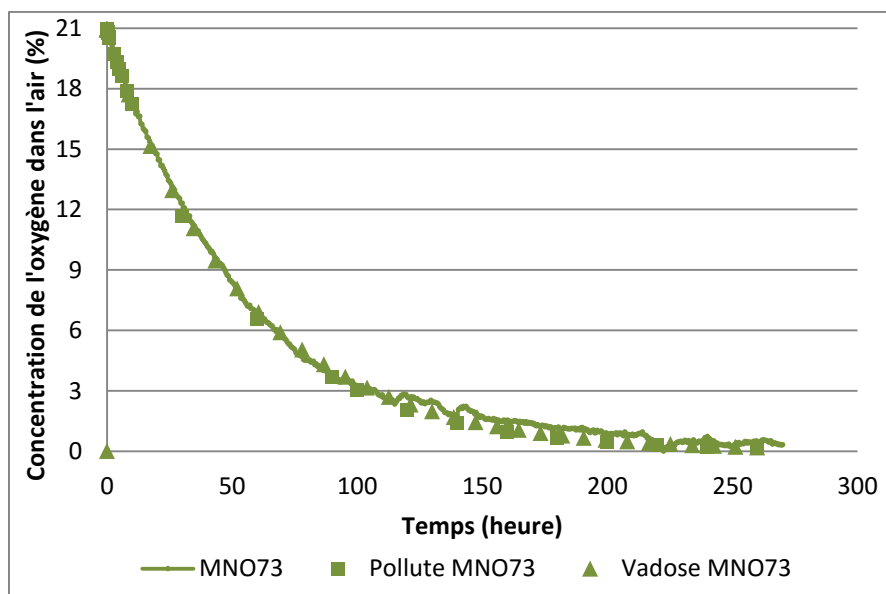
Résultats de l'essai de consommation de l'oxygène sur le résidu MO sat3 (Sr = 89% ; valeurs déduites de $D_e = 0,2 \text{ m}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ et $K_r = 7,6 \text{ an}^{-1}$) et valeurs de la concentration d'oxygène obtenues des simulations réalisées avec POLLUTE et Vadose/W



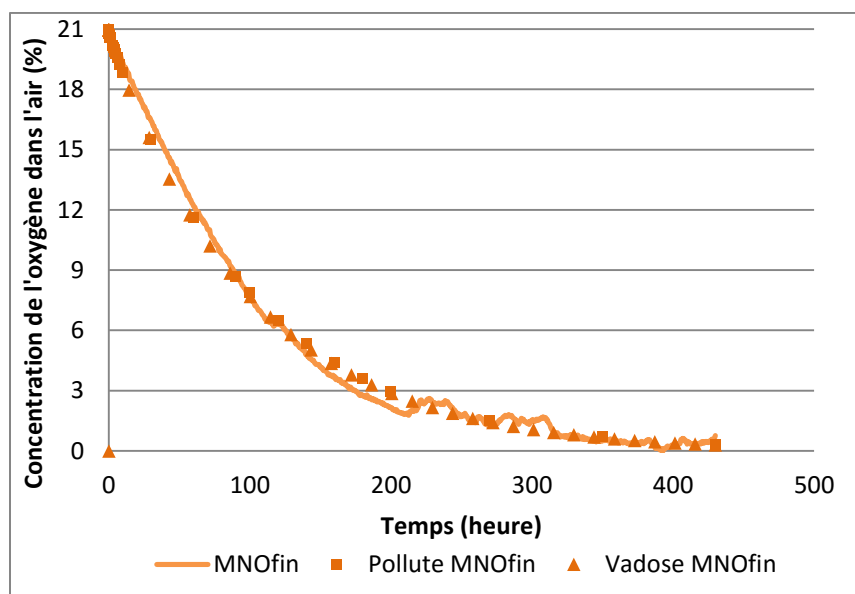
Résultats de l'essai de consommation de l'oxygène sur le résidu MNO28 (Sr = 36% ; valeurs déduites de $D_e = 54,4 \text{ m}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ et $K_r = 176,3 \text{ an}^{-1}$) et valeurs de la concentration d'oxygène obtenues des simulations réalisées avec POLLUTE et Vadose/W



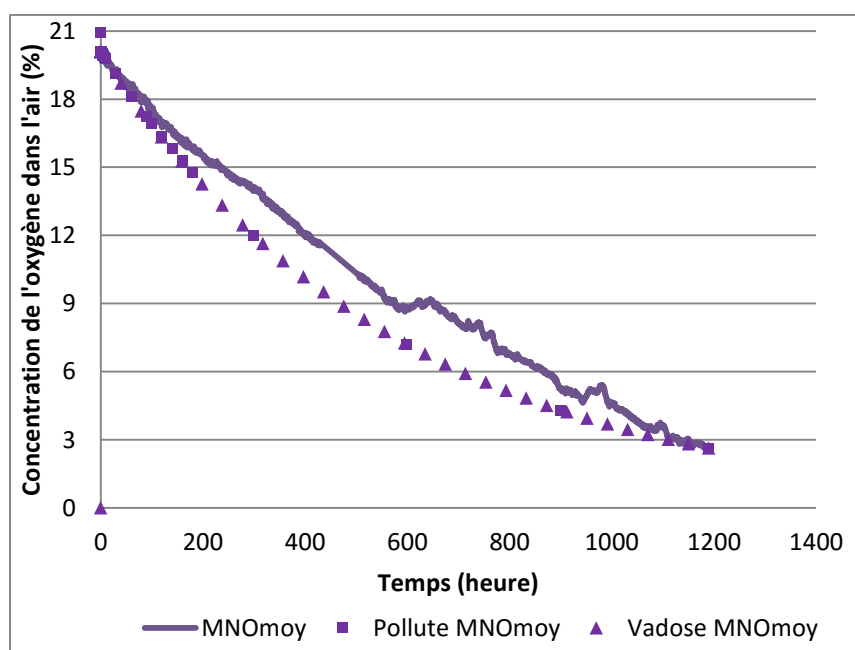
Résultats de l'essai de consommation de l'oxygène sur le résidu MNO50 ($S_r = 32\%$; valeurs déduites de $D_e = 67,6 \text{ m}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ et $K_r = 286,6 \text{ an}^{-1}$) et valeurs de la concentration d'oxygène obtenues des simulations réalisées avec POLLUTE et Vadose/W



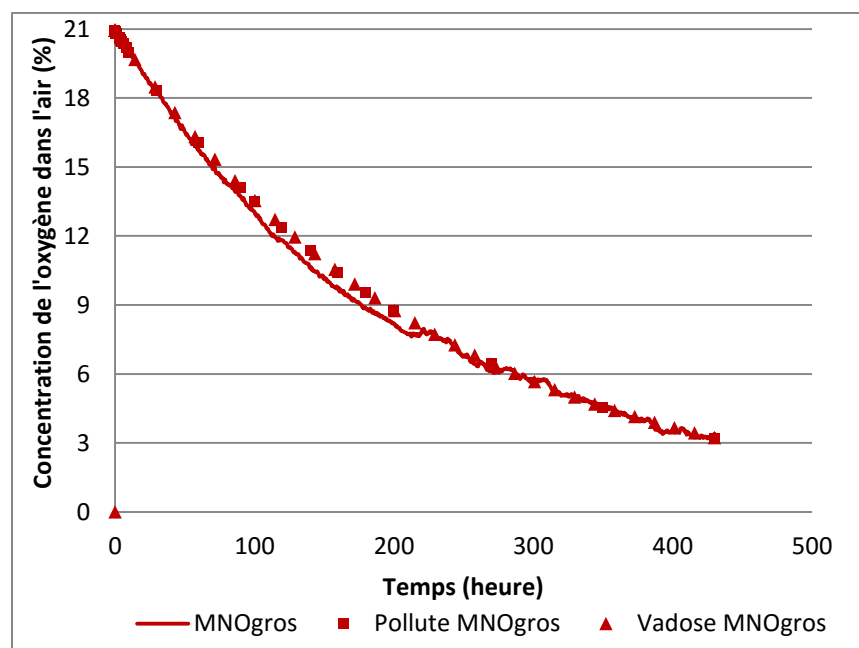
Résultats de l'essai de consommation de l'oxygène sur le résidu MNO73 ($S_r = 45\%$; valeurs déduites de $D_e = 31,6 \text{ m}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ et $K_r = 299,6 \text{ an}^{-1}$) et valeurs de la concentration d'oxygène obtenues des simulations réalisées avec POLLUTE et Vadose/W



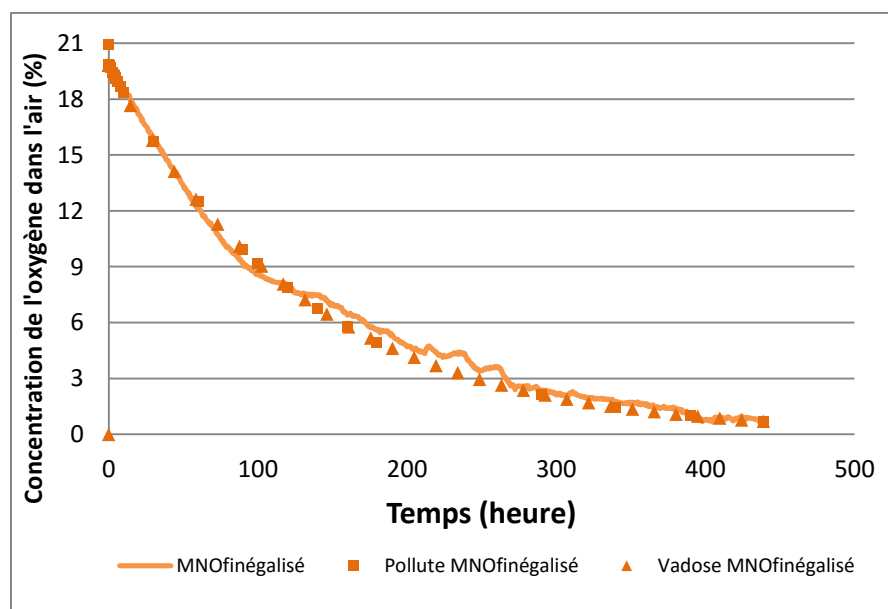
Résultats de l'essai de consommation de l'oxygène sur le résidu MNOfin ($S_r = 23\%$; valeurs déduites de $D_e = 123,2 \text{ m}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ et $K_r = 299,1 \text{ an}^{-1}$) et valeurs de la concentration d'oxygène obtenues des simulations réalisées avec POLLUTE et Vadose/W



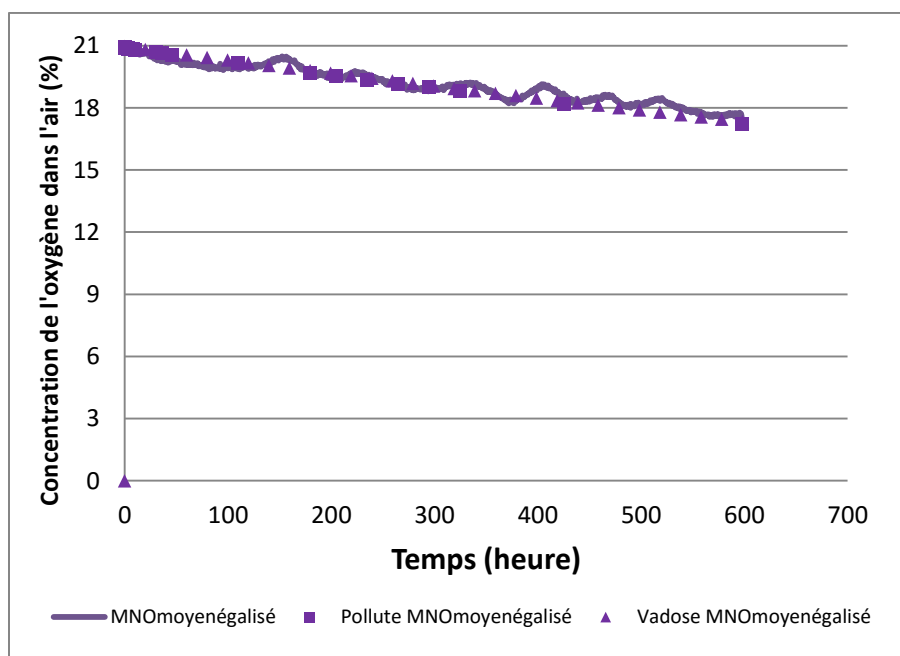
Résultats de l'essai de consommation de l'oxygène sur le résidu MNOmoy ($S_r = 24\%$; valeurs déduites de $D_e = 112,4 \text{ m}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ et $K_r = 69,4 \text{ an}^{-1}$) et valeurs de la concentration d'oxygène obtenues des simulations réalisées avec POLLUTE et Vadose/W



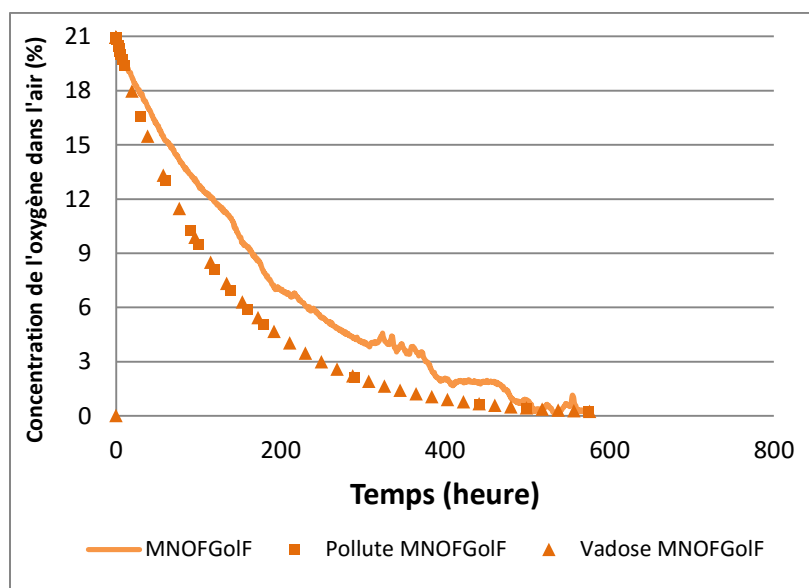
Résultats de l'essai de consommation de l'oxygène sur le résidu MNOgros ($S_r = 32\%$; valeurs déduites de $D_e = 68,3 \text{ m}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ et $K_r = 132 \text{ an}^{-1}$) et valeurs de la concentration d'oxygène obtenues des simulations réalisées avec POLLUTE et Vadose/W



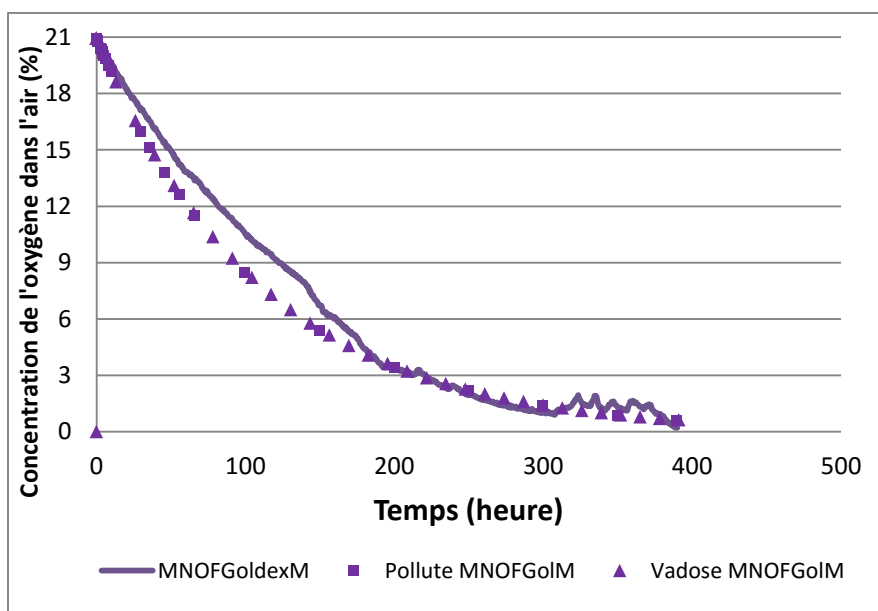
Résultats de l'essai de consommation de l'oxygène sur le résidu MNOfin égalisé ($S_r = 26\%$; valeurs déduites de $D_e = 100,1 \text{ m}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ et $K_r = 269,2 \text{ an}^{-1}$) et valeurs de la concentration d'oxygène obtenues des simulations réalisées avec POLLUTE et Vadose/W



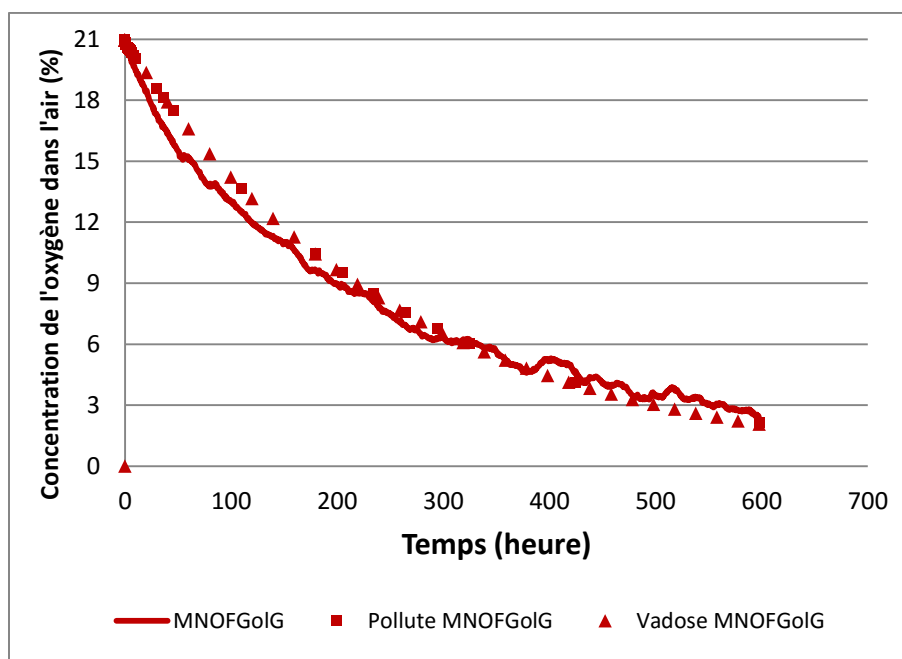
Résultats de l'essai de consommation de l'oxygène sur le résidu MNOmoy égalisé ($S_r = 24\%$; valeurs déduites de $D_e = 113 \text{ m}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ et $K_r = 11,1 \text{ an}^{-1}$) et valeurs de la concentration d'oxygène obtenues des simulations réalisées avec POLLUTE et Vadose/W



Résultats de l'essai de consommation de l'oxygène sur le résidu MNOfin-Goldexfin ($S_r = 30\%$; valeurs déduites de $D_e = 86,3 \text{ m}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ et $K_r = 258 \text{ an}^{-1}$) et valeurs de la concentration d'oxygène obtenues des simulations réalisées avec POLLUTE et Vadose/W



Résultats de l'essai de consommation de l'oxygène sur le résidu MNOfin-Goldexmoy ($S_r = 35\%$; valeurs déduites de $D_e = 62,8 \text{ m}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ et $K_r = 265 \text{ an}^{-1}$) et valeurs de la concentration d'oxygène obtenues des simulations réalisées avec POLLUTE et Vadose/W



Résultats de l'essai de consommation de l'oxygène sur le résidu MNOfin-Goldexgros ($S_r = 43\%$; valeurs déduites de $D_e = 34,2 \text{ m}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ et $K_r = 86,7 \text{ an}^{-1}$) et valeurs de la concentration d'oxygène obtenues des simulations réalisées avec POLLUTE et Vadose/W

**ANNEXE G – EXEMPLE DE CALCUL AMENANT A LA
DÉTERMINATION DE LA PLAGE D'INCERTITUDE DU DEGRÉ DE
SATURATION POUR LES ESSAIS DE DIFFUSION ET DE
CONSOMMATION DE L'OXYGÈNE**

date	20-mai-14				
Matériel	MNO50				
D_r	2,907				
w% (-)	0,13				
Masse sol humide (Msh en g)	249,4				
Diamètre de la cellule (D en mm)	81,61				
mesures					moyenne
Hauteur cellule (Hc en mm)	77,07	77,07	77,12	77,06	77,08
Hauteur au-dessus de la plaque posée sur le sol (Hr en mm)	39,92	38,53	37,53	38,71	38,67
Épaisseur de la plaque (Hp en mm)	6,90	6,87	6,93	6,95	6,91

L'épaisseur moyenne du résidu (E_r , en mm) = $H_c - H_r - H_p = 31.5$ mm

Masse sol sec (M_d , en g) = $M_{sh}/(1+w) = 220,6$ g

Volume total du résidu (V_t en cm^3) = $2 \times \pi \times (D/2/10)^2 \times E_r/10 = 164,8$ cm^3

Volume du solide (V_s en cm^3) = $M_d/D_r = 220,6$ g

Porosité $n = (V_t - V_s)/V_s = 0,54$

Teneur en eau volumique (θ_w) = $w \times (1-n) \times D_r = 0,175$

Degré de saturation $S_r = \theta_w/n = 0,32$

Détermination de l'épaisseur minimale :

$E_{rmin} = H_{cmin} - H_{rmax} - H_p = 77,06 - 39,92 - 6,91 = 30.23$ mm

En suivant les étapes de calculs précédentes à partir de la valeur d'épaisseur minimale, on trouve $S_{rmax} = 0,35$

Détermination de l'épaisseur maximale :

$E_{rmax} = H_{cmax} - H_{rmin} - H_p = 77,12 - 37,53 - 6,91 = 32,68$ mm

En suivant les étapes de calculs précédentes à partir de la valeur d'épaisseur minimale, on trouve
 $Sr_{max} = 0,30$

ANNEXE H – EXEMPLE DE CALCUL AMENANT À LA DÉTERMINATION DE LA PLAGE D'INCERTITUDE DU COEFFICIENT DE DIFFUSION POUR LES ESSAIS DE DIFFUSION ET DE CONSOMMATION DE L'OXYGÈNE

On prend l'échantillon MNO50 dont les valeurs des degrés de saturation minimale et maximale sont présentées à l'annexe A5.1.

L'épaisseur minimale est $E_{r_{\min}} = 30.23 \text{ mm}$

La porosité minimale (voir étapes de calculs à l'annexe A5.1) $n_{\min} = 0,52$

La teneur en eau volumique maximale (voir étapes de calculs à l'annexe A5.1) $\theta_{w_{\max}} = 0,18$

La teneur en air volumique minimale $\theta_{a_{\min}} = n - \theta_{w_{\max}} = 0,34$

On en déduit la valeur de D_e prédit minimale d'après ces caractéristiques et la formule prédictive d'Aachib et al. (2004) (éq. 2.45) $D_{e_{\min}} = 1,81 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{an}^{-1}$

Afin de déterminer la valeur de D_e prédit maximale, on procède de la même manière en se basant sur la valeur de l'épaisseur maximale du résidu.

ANNEXE I –EXEMPLE DE CALCUL AMENANT À LA DÉTERMINATION DE LA PLAGE D’INCERTITUDE DU COEFFICIENT DU TAUX DE RÉACTION POUR LES ESSAIS DE CONSOMMATION DE L’OXYGÈNE

Les calculs pour les valeurs de Kr_{\min} et Kr_{\max} prédites s’effectuent à partir de la formule prédictive de Collin (équ. 2.51) et les valeurs de porosité minimale et maximale (voir Annexe A5.1).

Pour l’échantillon MNO50, $n_{\min} = 0,52$ et $Kr_{\max} = 515 \text{ an}^{-1}$
 $n_{\max} = 0,55$ et $Kr_{\min} = 483 \text{ an}^{-1}$

Les calculs pour les valeurs de Kr_{\min} et Kr_{\max} mesurés sont effectués directement par le logiciel numérique POLLUTE.

Pour la détermination du taux de réaction minimale Kr_{\min} , on entre les valeurs d’épaisseur minimale, saturation maximale, coefficient de diffusion minimal (voir annexe A5.1 et A5.2) dans le modèle numérique.

L’itération amène à la détermination de la valeur de Kr_{\min} . Pour l’échantillon MNO50, $Kr_{\min} = 104 \text{ an}^{-1}$.

Pour la détermination du taux de réaction maximal Kr_{\max} , on procède de la même manière avec les valeurs d’épaisseur maximale, saturation minimale, coefficient de diffusion maximal (voir annexe A5.1 et A5.2) dans le modèle.

L’itération amène à la détermination de la valeur de Kr_{\max} . Pour l’échantillon MNO50, $Kr_{\max} = 119 \text{ an}^{-1}$.

**ANNEXE J – RÉSULTATS DES CALCULS D’INCERTITUDE SUR LE
PARAMÈTRES K_r POUR LES ESSAIS DE CONSOMMATION DE
L’OXYGÈNE MENÉS SUR LES ÉCHANTILLONS DES SÉRIES 2, 3 ET 4**

Échantillons		K_r Collin (/an)	K_r Collin min (/an)	K_r Collin max (/an)	K_r (/an)	K_r min (/an)	K_r max (/an)
série 2	MNOfin	1434	1395	1514	299	281	333
	MNOmoy	180	166	193	69	58	70
	MNOgros	91	85	95	132	124	142
série 3	MNOfin égalisé	1083	1056	1137	269	231	256
	MNOmoy égalisé	124	118	134	11	9	10
série 4	MNOfin Goldexfin	685	668	720	258	254	270
	MNOfin Goldexmoy	380	371	389	265	244	251
	MNOfin GoldexGros	250	245	260	87	75	80

ANNEXE K –ANALYSE DES PARAMÈTRES NORMALISÉS

Définition des fonctions de normalisation

Les valeurs de K_r prédites et obtenues expérimentalement ont aussi été exprimées en fonction de paramètres normalisés selon l'équation du modèle de Collin (1987) (éq 2.51). Ainsi, l'équation pour isoler l'effet de la teneur en pyrite C_p peut s'exprimer comme suit :

$$(K_r)_{C_p} = \frac{K_r * D_H}{(1 - n) * 6 * K'} = C_p \quad (K.1)$$

Avec $(K_r)_{C_p}$ (kg.kg^{-1}) ; D_H est le diamètre équivalent (en m) déterminé selon l'équation 2.50 (de Aubertin et al. 1998).

L'équation utilisée pour isoler l'effet du diamètre équivalent D_H est la suivante :

$$(K_r)_{D_H} = \frac{K_r}{(1 - n) * C_p * 6 * K'} = \frac{1}{D_H} \quad (K.2)$$

Avec $(K_r)_{D_H}$ en m^{-1} ; les paramètres D_H et S_s sont reliés par l'équation 2.56 qui prend en compte le facteur de forme alpha et la densité sèche. L'équation pour isoler l'effet de la surface spécifique S_s serait donc la même que pour celle pour isoler l'effet du paramètre D_H (éq. K.2).

Le degré de saturation S_r n'est pas pris en compte dans le modèle de Collin.

En plus de nos propres résultats expérimentaux, certaines données issues des travaux précédents menés par Gosselin (2007) et sur des matériaux similaires sont reprises et analysées (et normalisées) afin d'évaluer l'influence des mêmes paramètres. Six autres matériaux ont ainsi été étudiés, soit les résidus provenant des sites miniers Bulhyanulu, Louvicourt, Selbaie (frais et oxydés) et Manitou (frais et oxydés). On a considéré ici trente-trois essais de consommation d'oxygène (cellule à un réservoir).

L'effet de la teneur en pyrite (C_p), du diamètre équivalent (D_H) et du degré de saturation (S_r) sont analysés dans ce qui suit.

Influence de la teneur en pyrite (C_p)

Résultats du mémoire

Les résultats de l'analyse de l'effet du paramètre C_p sur la réactivité sont présentés au tableau K.1 et à la figure K.1. Le tableau K.1 inclut les valeurs de $(K_r)_{C_p}$ (kg.kg^{-1}) obtenues à partir de l'équation K.1 et la figure K.1 illustre ces résultats en fonction du paramètre C_p . Ces valeurs sont comparées à celles obtenues selon le modèle prédictif de Collin (1987). Cette représentation montre que le modèle de Collin tend usuellement à surestimer les valeurs réelles de K_r (excepté pour l'échantillon MNOgros), tel que mentionné au chapitre 5.

Tableau K.1 : Valeurs des coefficient du taux de réaction normalisé $(K_r)_{C_p}$ (équ. K.1) selon la teneur en pyrite C_p pour l'ensemble des séries d'essais.

Échantillons		C_p moyen (kg.kg^{-1})	$(K_r)_{C_p}$ (kg.kg^{-1})
Série 1	MNO	0,17	$4,92 \times 10^{-2}$
	MNO bis	0,17	$4,94 \times 10^{-2}$
	MNO28	0,06	$3,40 \times 10^{-2}$
	MNO50	0,09	$5,24 \times 10^{-2}$
	MNO75	0,14	$5,54 \times 10^{-2}$
Série 2	MNOfin	0,19	$3,87 \times 10^{-2}$
	MNOmoy	0,14	$5,52 \times 10^{-2}$
	MNOgros	0,10	$1,48 \times 10^{-1}$
Série 3	MNOfin égalisé	0,11	$2,71 \times 10^{-2}$
	MNOmoy égalisé	0,11	$9,52 \times 10^{-3}$
Série 4	MNOfin Gxfin	0,07	$2,50 \times 10^{-2}$
	MNOfin Gxmoy	0,07	$5,19 \times 10^{-2}$
	MNOfin Gxgros	0,06	$2,13 \times 10^{-2}$
Série 5	MO	0,01	$1,56 \times 10^{-3}$
	MO sat	0,01	$2,54 \times 10^{-3}$
	MO sat2	0,01	$6,30 \times 10^{-3}$
	MO sat3	0,01	$3,40 \times 10^{-3}$
	MNO sat2	0,17	$5,24 \times 10^{-3}$
	MNO sat3	0,17	$4,49 \times 10^{-3}$

On remarque que les valeurs de $(K_r)_{C_p}$ obtenues des essais en laboratoire pour l'ensemble des résidus et séries de mélanges sont relativement proches les unes des autres, quel que soit la valeur de la teneur en pyrite C_p (excepté pour l'échantillon MNOgros). La proportionnalité linéaire entre C_p et $(K_r)_{C_p}$ postulée par le modèle ne serait donc pas confirmée par ces résultats.

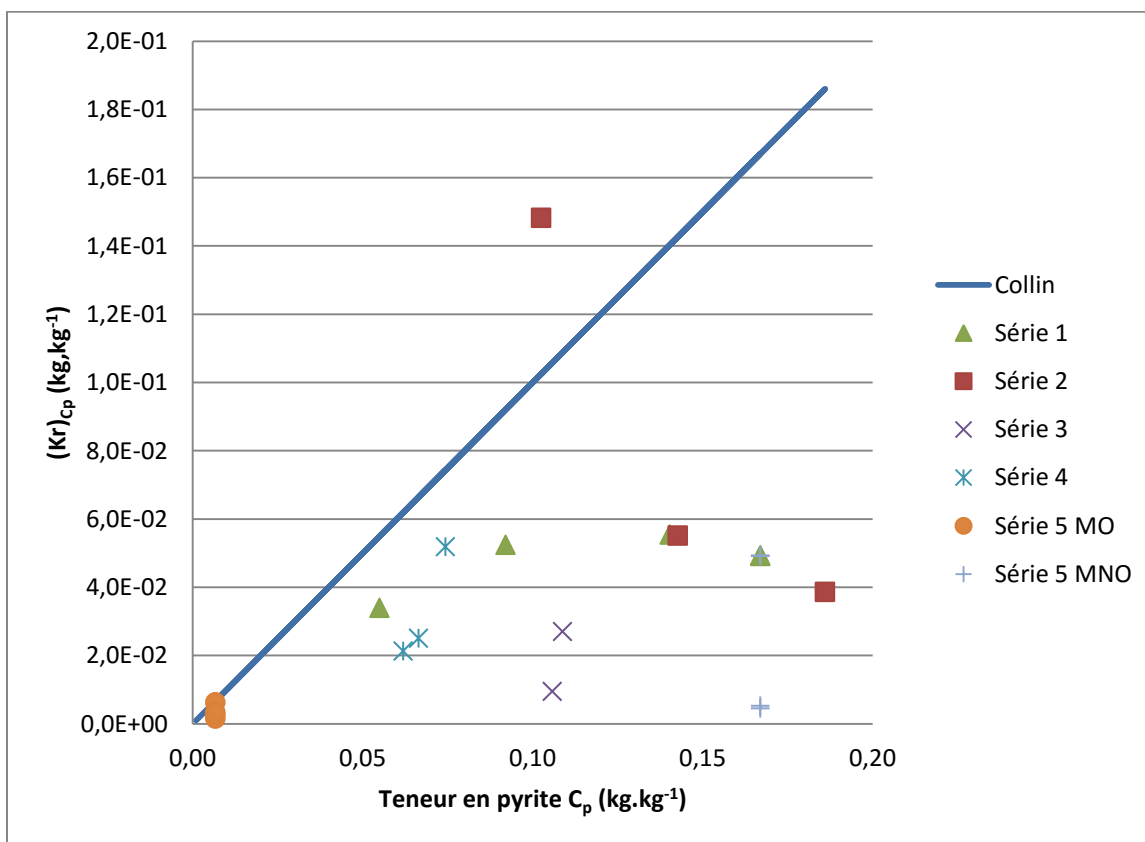


Figure K.1 : Valeurs du coefficient du taux de réaction normalisé $(K_r)_{C_p}$ prédites et obtenues expérimentalement en fonction de la teneur en pyrite C_p pour l'ensemble des séries d'essais (voir tableau K.1).

Résultats d'essais précédents

Les données précédentes obtenues d'essais de consommation d'oxygène en cellule à 1 réservoir menés par Gosselin (2007) sont résumées dans le tableau K.2. Les résidus provenaient des mines Bulyanhulu (11 essais), Louvicourt (9 essais), Manitou (3 essais sur matériaux non oxydés, 2 sur matériaux oxydés) et Selbaie (3 essais sur matériaux non oxydés, 5 sur matériaux oxydés). Ces essais de consommation avaient notamment pour objectif d'analyser l'effet de divers paramètres (incluant le degré de saturation S_r) sur la réactivité à l'oxygène. Les valeurs des paramètres C_p et D_H sont donc uniques pour un résidu donné (p. ex. Buly1 à Buly11). Les valeurs de taux de réactions moyen normalisé $(K_r)_{C_p}$ ont été calculées à partir des résultats moyen sur un même matériau.

La figure K.2 montre les valeurs moyennes de $(K_r)_{C_p}$ (kg.kg^{-1}) prédites et celles obtenues expérimentalement en fonction de la teneur en pyrite C_p pour l'ensemble des essais réalisés. Les résidus MO, SO et SNO présentent des valeurs moyennes de $(K_r)_{C_p}$ prédites et expérimentales relativement comparables. Pour les résidus MNO Buly et Louvicourt, on constate une légère surestimation des valeurs de $(K_r)_{C_p}$ prédites par rapports aux valeurs tirées des essais. Pour ces données expérimentales, il semble y avoir une relation (quasi) linéaire entre C_p et $(K_r)_{C_p}$ moyens.

Tableau K.2 : Valeurs des coefficients du taux de réaction normalisé $(K_r)_{C_p}$ (éq. K.1) selon la teneur en pyrite C_p prédits et mesurés, pour l'ensemble des séries d'essais antérieurs (données tirées de Gosselin, 2007). On montre aussi les moyennes des taux de réaction normalisés pour chaque résidu.

Échantillons	Teneur en pyrite C_p (kg.kg ⁻¹)	Taux de réaction normalisé $(K_r)_{C_p}$ prédit (kg.kg ⁻¹)	Taux de réaction normalisé $(K_r)_{C_p}$ mesuré (kg.kg ⁻¹)	Taux de réaction normalisé $(K_r)_{C_p}$ mesuré (moyenne des mesures sur un même échantillon) (kg.kg ⁻¹)
Buly 1	0,12	$1,14 \times 10^{-2}$	$5,52 \times 10^{-2}$	$5,24 \times 10^{-2}$
Buly 2			$6,11 \times 10^{-3}$	
Buly 3			$1,97 \times 10^{-2}$	
Buly 4			$9,90 \times 10^{-3}$	
Buly 5			$9,28 \times 10^{-3}$	
Buly 6			$1,74 \times 10^{-1}$	
Buly 7			$1,01 \times 10^{-1}$	
Buly 8			$1,70 \times 10^{-1}$	
Buly 9			$8,42 \times 10^{-3}$	
Buly 10			$1,98 \times 10^{-2}$	
Buly 11			$3,21 \times 10^{-3}$	
Lou S3-1	0,38	$3,60 \times 10^{-2}$	$2,39 \times 10^{-2}$	$3,34 \times 10^{-1}$
Lou S3-2			$3,43 \times 10^{-1}$	
Lou S3-3			$6,28 \times 10^{-1}$	
Lou S3-4			$6,20 \times 10^{-1}$	
Lou S3-5			$5,96 \times 10^{-1}$	
Lou S3-6			$1,41 \times 10^{-1}$	
Lou S3-7			$4,17 \times 10^{-1}$	
Lou S3-8			$7,51 \times 10^{-2}$	
Lou S3-9			$1,57 \times 10^{-1}$	
MNO1	0,1187	$1,13 \times 10^{-2}$	$5,97 \times 10^{-2}$	$6,12 \times 10^{-2}$
MNO2			$4,87 \times 10^{-2}$	
MNO3			$7,53 \times 10^{-2}$	
MO1	0,0047	$4,46 \times 10^{-4}$	$6,64 \times 10^{-3}$	$6,18 \times 10^{-3}$
MO2			$5,73 \times 10^{-3}$	
SNO1	0,0167	$1,58 \times 10^{-3}$	$4,99 \times 10^{-2}$	$3,05 \times 10^{-2}$
SNO2			$2,30 \times 10^{-2}$	
SNO3			$1,87 \times 10^{-2}$	
SO1	0,0403	$3,82 \times 10^{-3}$	$4,08 \times 10^{-2}$	$2,56 \times 10^{-2}$
SO2			$1,13 \times 10^{-2}$	
SO3			$3,97 \times 10^{-2}$	
SO4			$5,60 \times 10^{-3}$	
SO5			$3,06 \times 10^{-2}$	

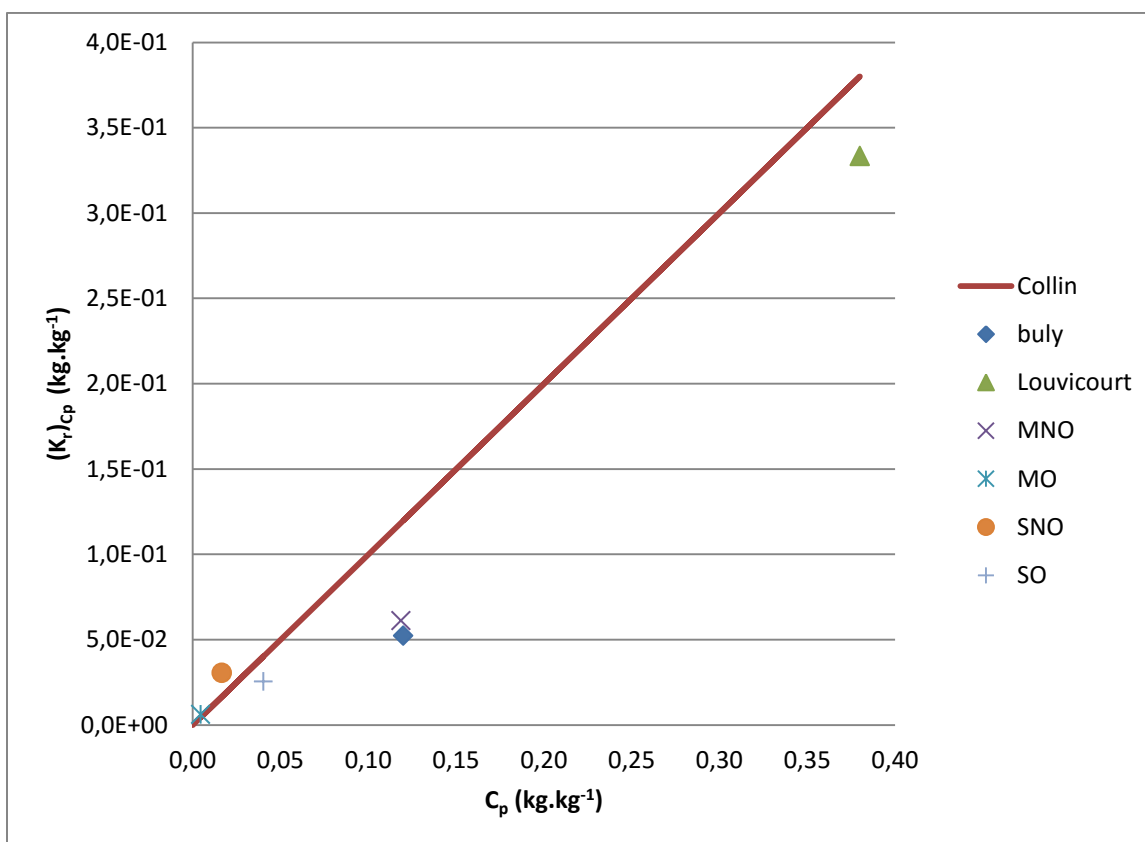


Figure K.2 : Valeurs du coefficient du taux de réaction normalisé $(K_r)_{Cp}$ prédites et obtenues expérimentalement en fonction de la teneur en pyrite C_p pour l'ensemble des essais réalisés par Gosselin (2007) (tableau K.2).

Influence de la granulométrie

Résultats du mémoire

Les résultats de l'analyse de l'effet du paramètre D_H sur la réactivité sont présentés au tableau K.3 et aux figures K.3 et K.4. Le tableau K.3 résume les résultats des calculs pour les valeurs du taux de réaction normalisées $(K_r)_{DH}$ (eq. K.2) (an^{-1}) pour l'ensemble des séries d'échantillons. La figure K.3 illustre ces résultats dans un graphique $(K_r)_{DH}$ en fonction de D_H . Les résultats indiquent que le modèle de Collin tend à surestimer les valeurs réelles de K_r pour l'ensemble des échantillons (excepté l'échantillon MNOgros), tel que mentionner au chapitre 5. Nos résultats ne semblent pas suivre la tendance à la base de ce modèle.

La figure K.4 montre les valeurs de $(K_r)_{DH}$ prédites en fonction des valeurs de $(K_r)_{DH}$ obtenues expérimentalement. On note des écarts relativement importants, surtout lorsque la valeur de D_H diminue.

Tableau K.3 : Valeurs des coefficients du taux de réaction normalisé $(K_r)_{DH}$ (éq. K.2) prédits et mesurés selon le diamètre équivalent D_H et de la surface spécifique déduite de la méthode de Chapuis et Légaré (1992), pour l'ensemble des séries d'essais.

Échantillons		Diamètre équivalent D_H (mm)	Surface spécifique S_s Chapuis et Légaré ($m^2.kg^{-1}$)	$(K_r)_{DH}$ (m^{-1})
Série 1	MNO	$6,75 \times 10^{-3}$	312	$4,14 \times 10^3$
	MNO bis	$6,75 \times 10^{-3}$	312	$4,15 \times 10^3$
	MNO28	$9,28 \times 10^{-3}$	279	$6,31 \times 10^3$
	MNO50	$8,13 \times 10^{-3}$	308	$6,64 \times 10^3$
	MNO75	$8,73 \times 10^{-3}$	284	$4,29 \times 10^3$
Série 2	MNOfin	$4,43 \times 10^{-3}$	452	$4,45 \times 10^3$
	MNOmoy	$3,09 \times 10^{-2}$	120	$1,19 \times 10^3$
	MNOgros	$5,00 \times 10^{-2}$	135	$2,74 \times 10^3$
Série 3	MNOfin égalisé	$3,81 \times 10^{-3}$	518	$6,19 \times 10^3$
	MNOmoy égalisé	$3,23 \times 10^{-2}$	89	$2,64 \times 10^2$
Série 4	MNOfin Gxfin	$3,68 \times 10^{-3}$	537	$9,70 \times 10^3$
	MNOfin Gxmoy	$8,17 \times 10^{-3}$	276	$8,10 \times 10^3$
	MNOfin Gxgros	$1,20 \times 10^{-2}$	224	$2,71 \times 10^3$
Série 5	MO	$1,73 \times 10^{-2}$	204	$1,28 \times 10^3$
	MO sat	$1,73 \times 10^{-2}$	204	$2,08 \times 10^3$
	MO sat2	$1,73 \times 10^{-2}$	204	$5,15 \times 10^3$
	MO sat3	$1,73 \times 10^{-2}$	204	$2,78 \times 10^3$
	MNO sat2	$6,75 \times 10^{-3}$	312	$4,41 \times 10^2$
	MNO sat3	$6,75 \times 10^{-3}$	312	$3,78 \times 10^2$

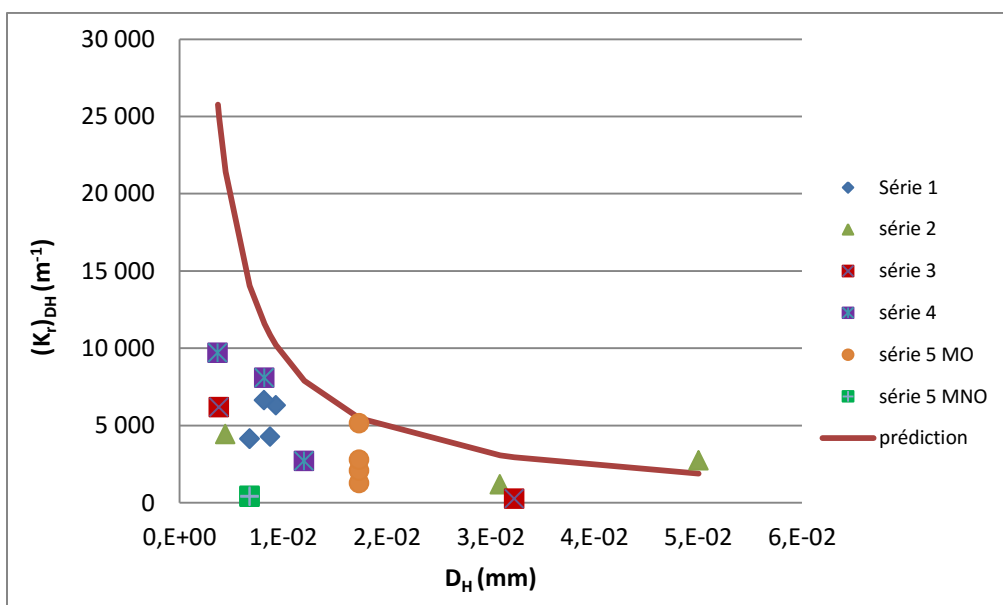


Figure K.3 : Valeurs du taux de réaction normalisées $(K_r)_{DH}$ prédites et obtenues expérimentalement en fonction du diamètre équivalent D_H pour l'ensemble des séries d'essais (voir tableau K.3).

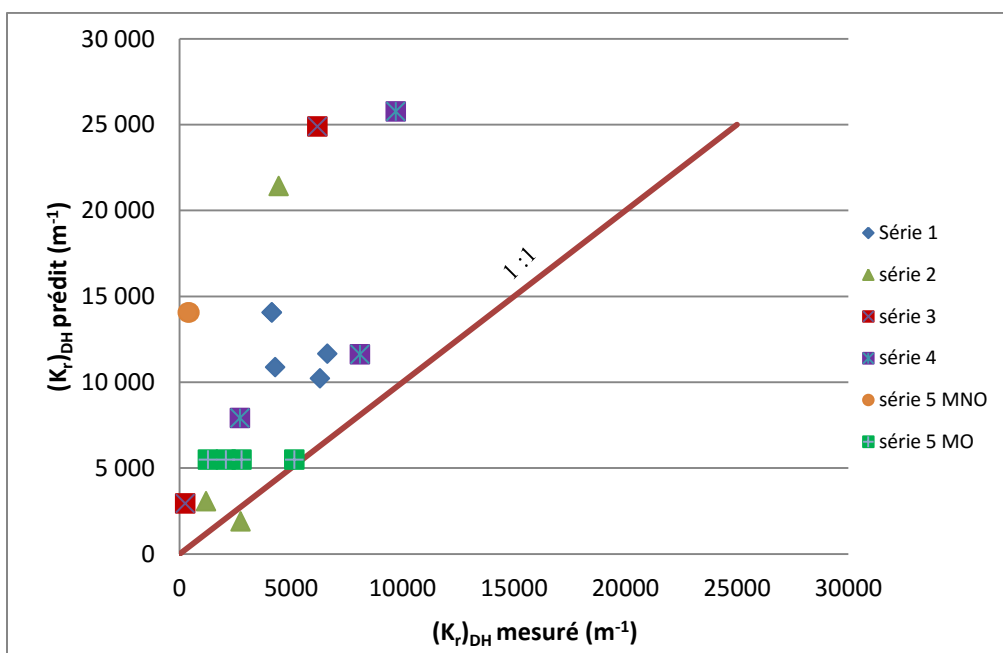


Figure K.4 : Valeurs du taux de réaction normalisé $(K_r)_{DH}$ prédites en fonctions des valeurs du taux de réactions normalisé $(K_r)_{DH}$ obtenues expérimentalement pour l'ensemble des séries d'essais (voir tableau K.3).

Résultats d'essais précédents

Les données précédentes obtenues d'essais de consommation d'oxygène en cellule à 1 réservoir menés par Gosselin (2007) sont résumées dans le tableau K.4. La figure K.5 compare les valeurs moyennes de $(K_r)_{Cp}$ (kg.kg^{-1}) prédites et celles obtenues expérimentalement en fonction du diamètre équivalent D_H pour l'ensemble des essais réalisés pour les résidus Buly, Louvicourt, Manitou et Selbaie. Les écarts entre le modèle prédictif et les résultats expérimentaux sont relativement marqués. Le modèle de Collin (1987) surestime les valeurs de $(K_r)_{DH}$ pour les résidus Louvicourt, Buly, SO et MNO et les sous-estime pour les résidus SNO et MO. La relation postulée par Collin entre D_H et K_r ne semble pas clairement vérifiée ici (bien qu'une certaine tendance puisse être décelée).

Tableau K.4 : Valeurs des coefficients du taux de réaction normalisé $(K_r)_{DH}$ (éq. K.2) prédites et mesurées en fonction du diamètre équivalent D_H , pour l'ensemble des séries d'essais antérieurs réalisés par Gosselin (2007). On montre aussi les moyennes des taux de réaction normalisés par résidu.

Échantillons	Diamètre équivalent D_H (mm)	Taux de réaction normalisé $(K_r)_{DH}$ prédit (m^{-1})	Taux de réaction normalisé $(K_r)_{DH}$ mesuré (m^{-1})	Taux de réaction normalisé $(K_r)_{DH}$ mesuré (moyennes des mesures sur un même échantillon) (m^{-1})
Buly 1	$6,87 \times 10^{-3}$	$1,38 \times 10^4$	$6,70 \times 10^4$	$6,35 \times 10^4$
Buly 2			$7,41 \times 10^3$	
Buly 3			$2,39 \times 10^4$	
Buly 4			$1,20 \times 10^4$	
Buly 5			$1,13 \times 10^4$	
Buly 6			$2,11 \times 10^5$	
Buly 7			$1,22 \times 10^5$	
Buly 8			$2,06 \times 10^5$	
Buly 9			$1,02 \times 10^4$	
Buly 10			$2,40 \times 10^4$	
Buly 11			$3,90 \times 10^3$	
Lou S3-1	$5,23 \times 10^{-3}$	$1,81 \times 10^4$	$1,20 \times 10^4$	$1,68 \times 10^5$
Lou S3-2			$1,72 \times 10^5$	
Lou S3-3			$3,16 \times 10^5$	
Lou S3-4			$3,12 \times 10^5$	
Lou S3-5			$3,00 \times 10^5$	
Lou S3-6			$7,08 \times 10^4$	
Lou S3-7			$2,10 \times 10^5$	
Lou S3-8			$3,77 \times 10^4$	
Lou S3-9			$7,92 \times 10^4$	
MNO1	$1,29 \times 10^{-2}$	$7,37 \times 10^3$	$3,91 \times 10^4$	$4,01 \times 10^4$
MNO2			$3,19 \times 10^4$	
MNO3			$4,94 \times 10^4$	
MO1	$1,28 \times 10^{-2}$	$7,42 \times 10^3$	$1,10 \times 10^5$	$1,03 \times 10^5$
MO2			$9,54 \times 10^4$	
SNO1	$1,29 \times 10^{-2}$	$7,34 \times 10^3$	$2,32 \times 10^5$	$1,42 \times 10^5$
SNO2			$1,07 \times 10^5$	
SNO3			$8,65 \times 10^4$	
SO1	$9,58 \times 10^{-3}$	$9,90 \times 10^3$	$1,06 \times 10^5$	$6,64 \times 10^4$
SO2			$2,94 \times 10^4$	
SO3			$1,03 \times 10^5$	
SO4			$1,45 \times 10^4$	
SO5			$7,94 \times 10^4$	

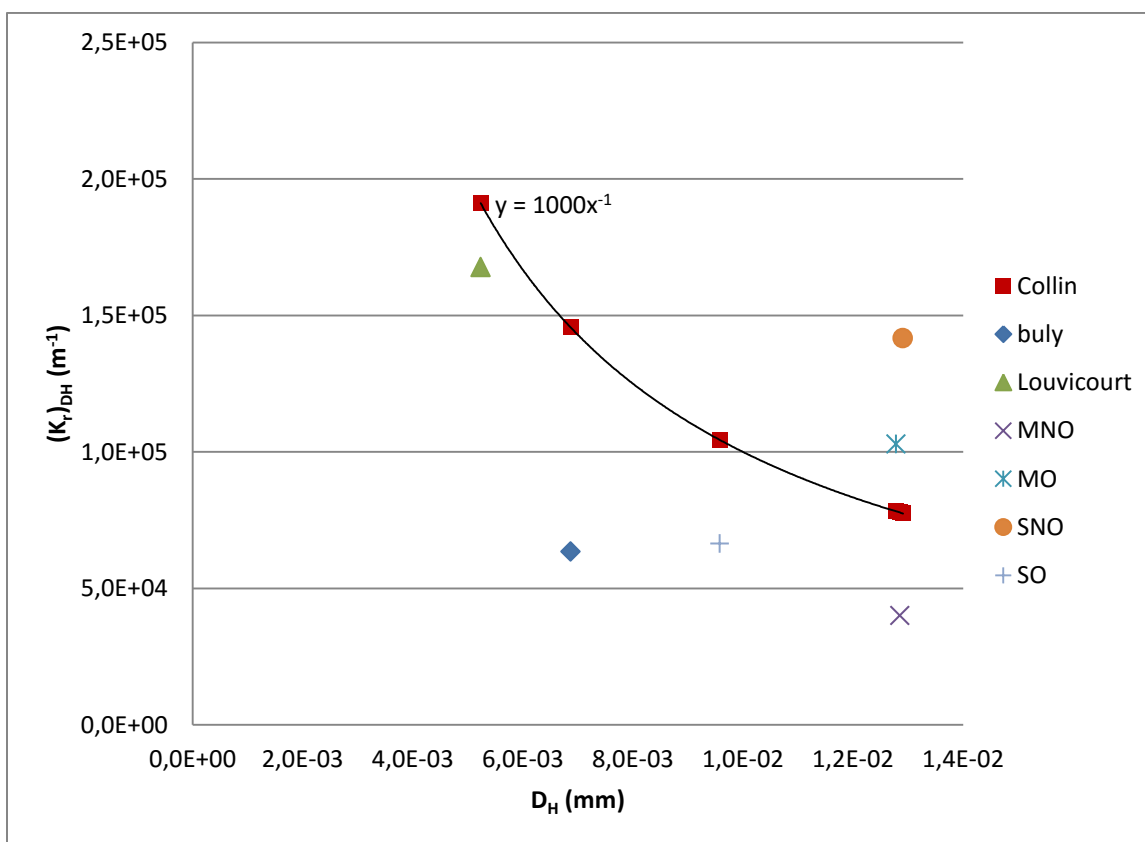


Figure K.5: Valeurs du taux de réaction normalisé $(K_r)_{DH}$ prédites et obtenues expérimentalement en fonction du diamètre équivalent D_H pour l'ensemble des essais réalisés par Gosselin (2007) (tableau K.4).

Influence du degré de saturation (S_r)

Résultats de la série 5

L'évaluation de l'effet du degré de saturation S_r sur le coefficient du taux de réaction à l'oxygène s'est faite sans le biais de normalisation car ce paramètre n'est pas pris en compte dans l'équation de Collin (1987). Les valeurs du coefficient du taux de réaction K_r (an^{-1}) pour les essais menés sur les échantillons de la série 5 sont présentées à la section 4.5 (tableaux 4.22 et 4.23). Les figures K.6 et K.7 illustrent ces résultats sur un graphique de la valeur de K_r en fonction du degré de saturation S_r pour les essais sur les résidus MNO et MO respectivement. Ces résultats ne semblent pas mettre en évidence de lien clair entre la valeur de S_r et celle de K_r ; on voit à

nouveau que le modèle de Collin tend à surestimer les valeurs de K_r pour l'ensemble des échantillons de résidus (qui ont des granulométries et teneur en pyrite variable).

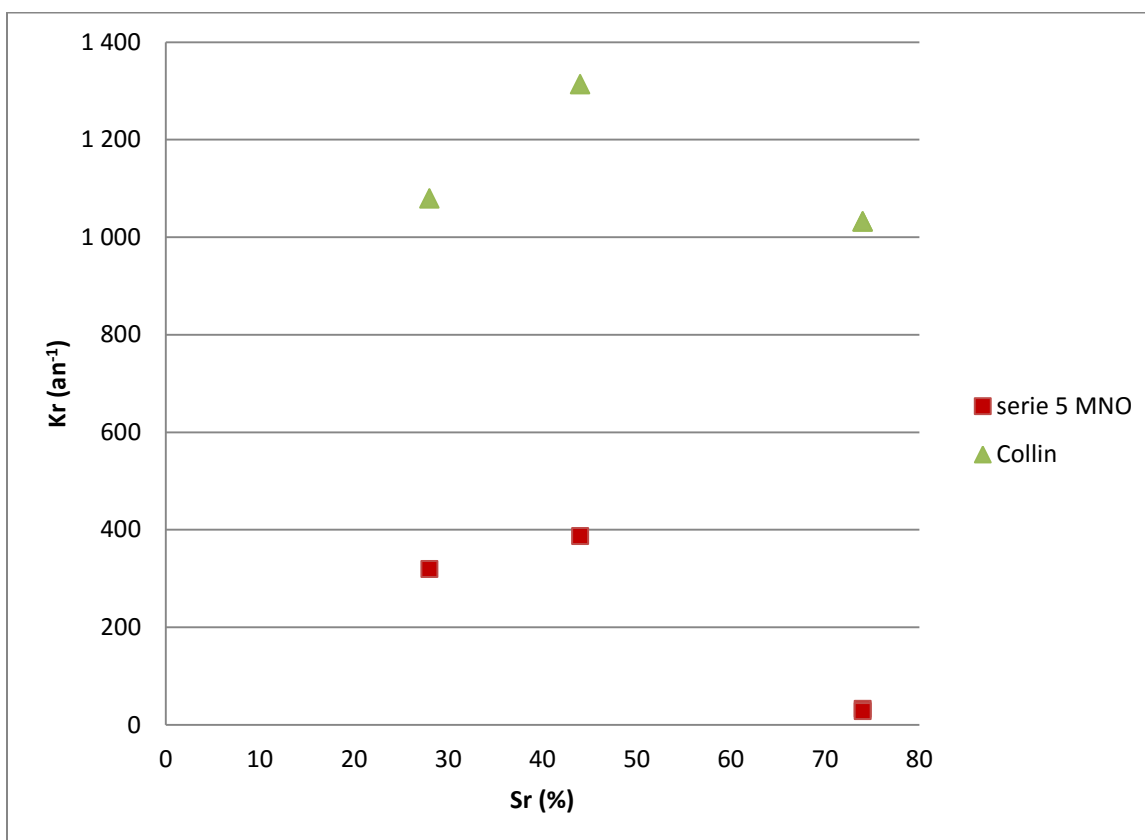


Figure K.6 : Valeurs des taux de réactions prédites et obtenues expérimentalement en fonction du degré de saturation S_r pour les échantillons MNO de la série 5 (voir tableau 4.23).

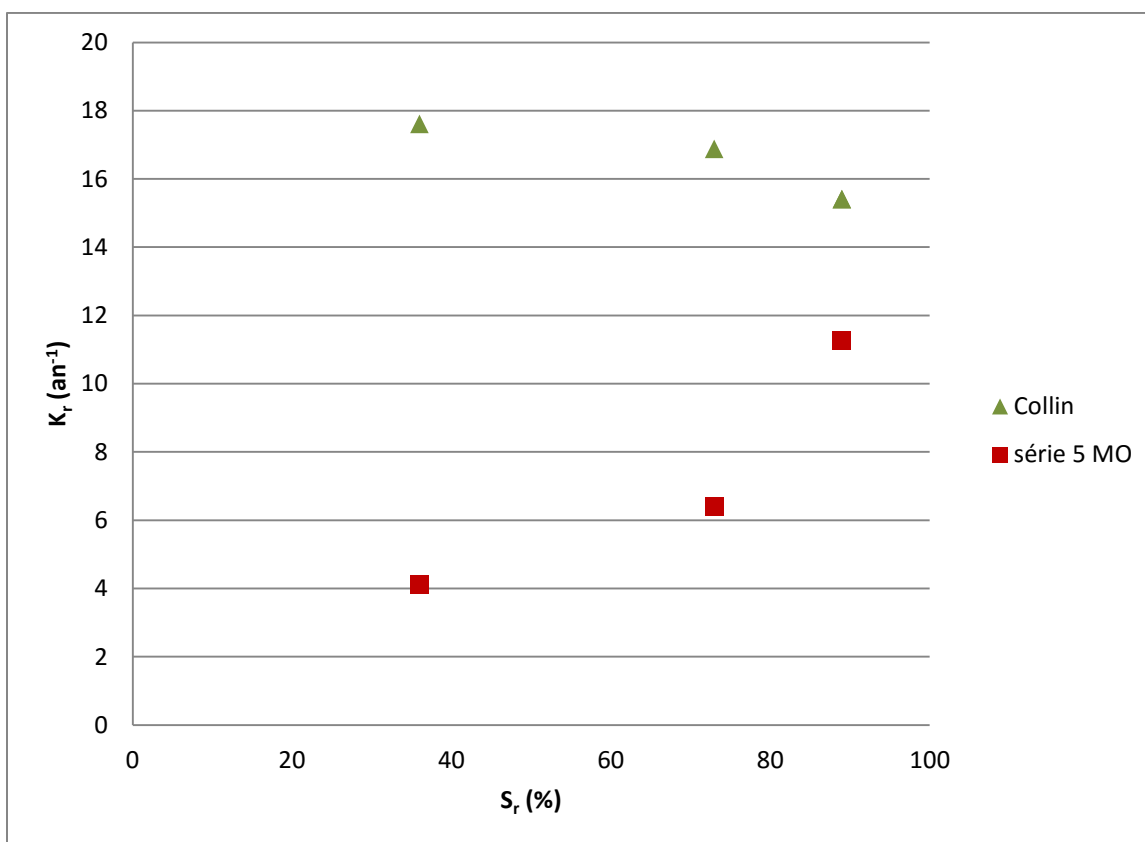


Figure K.7 : Valeurs du taux de réaction K_r prédites en fonction du degré de saturation S_r pour les échantillons MO de la série 5 (voir tableau 4.22).

Résultats d'essais précédents

Les données précédentes obtenues d'essais de consommation d'oxygène en cellule à 1 réservoir menés par Gosselin (2007) sont résumées dans le tableau K.5. La figure K.8 compare les valeurs de K_r prédites et celles obtenues expérimentalement pour l'ensemble des essais réalisés pour les résidus Buly, Louvicourt, Manitou et Selbaie. On constate que les écarts entre le modèle prédictif et les résultats peuvent être marqués.

La figure K.9 présente les valeurs de K_r en fonction de S_r . Cette relation entre ces deux paramètres n'est pas claire. Rappelons ici que l'imprécision des mesures peut engendrer une grande incertitude sur la valeur du degré de saturation, qui affecte en retour l'estimation de D_e et K_r lors de ces essais.

Tableau K.5 : Valeurs du degré de saturation S_r et des coefficients du taux de réaction K_r prédites et mesurées pour l'ensemble des séries d'essais antérieurs (Gosselin, 2007).

Échantillons	S_r	K_r Collin (/an)	K_r Pollute (/an)
Buly 1	1	1341	617
Buly 2	0,87	894	46
Buly 3	0,93	1076	177
Buly 6	0,88	944	78
Buly 7	0,92	993	77
Buly 8	0,32	861	1250
Buly 9	0,17	828	695
Buly 10	0,24	828	1170
Buly 11	0,93	960	67
Buly 12	1,06	431	71
Buly 13	0,93	960	26
Louvicourt S3-1	0,01	2891	182
Louvicourt S3-2	0,08	2960	2670
Louvicourt S3-3	0,19	2891	4780
Louvicourt S3-4	0,31	2960	4830
Louvicourt S3-5	0,57	3442	5400
Louvicourt S3-6	0,97	3992	1480
Louvicourt S3-7	0,7	3855	4230
Louvicourt S3-8	0,96	4268	843
Louvicourt S3-9	0,97	4199	1740
MNO3	0,68	499	251
MNO5	0,4	298	122
MNO12	0,62	490	311
MO1	0,42	18	26
MO2	0,63	20	24
SNO1	0,47	77	231
SNO3	0,71	80	110
SNO4	0,82	82	92
SO1	0,35	199	202
SO2	0,55	259	73
SO3	0,64	239	236
SO4	0,91	263	37
SO5	0,94	239	182

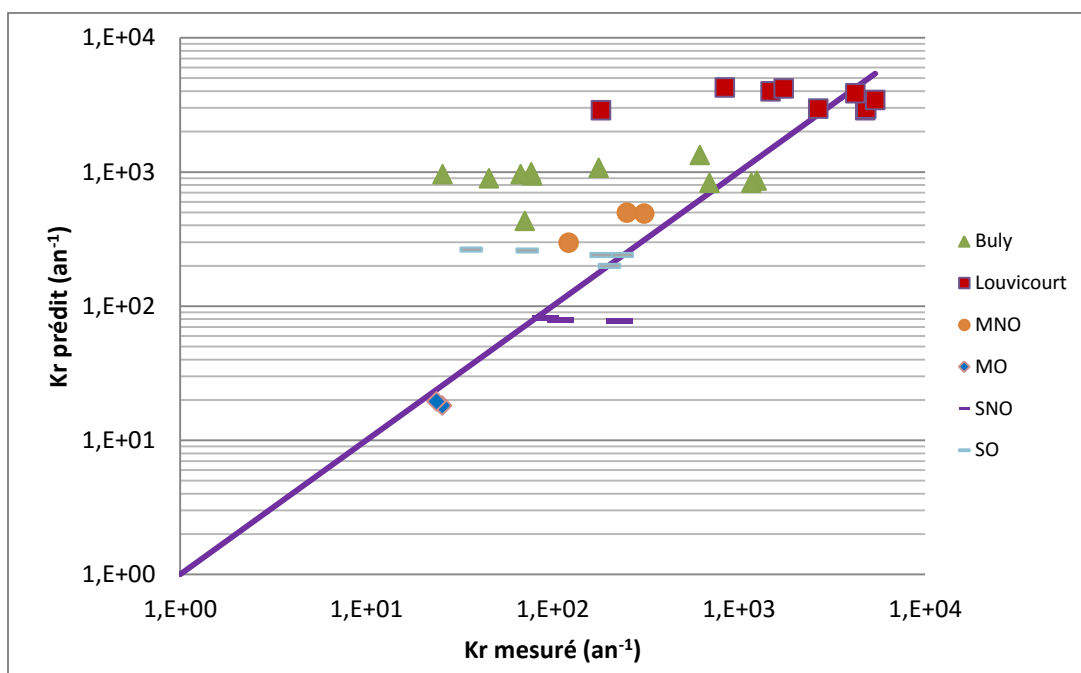


Figure K.8 : Valeurs du taux de réaction K_r prédites en fonctions des valeurs du taux de réactions K_r obtenues expérimentalement pour l'ensemble des séries d'essais antérieurs (voir tableau K.5 et Gosselin, 2007).

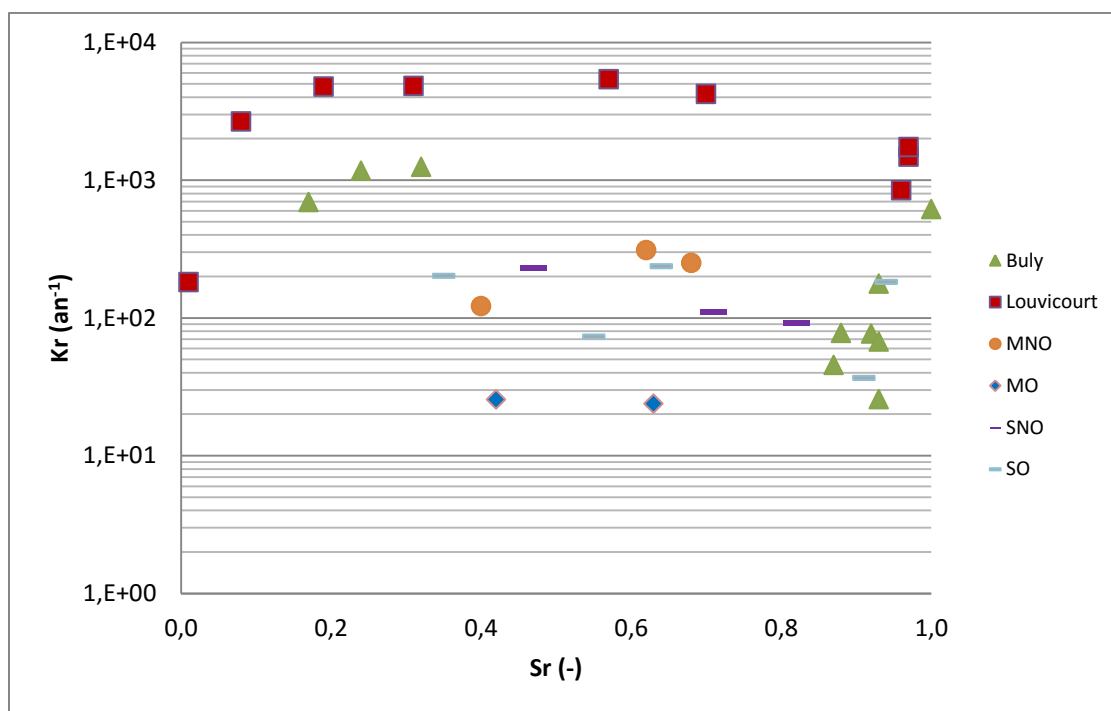


Figure K.9 : Valeurs des taux de réactions prédites et obtenues expérimentalement en fonction du degré de saturation S_r pour l'ensemble des séries d'essais antérieurs (voir tableau K.5 et Gosselin, 2007).

**ANNEXE L – RÉSULTATS DES ESSAIS DE CONSOMMATION
D'OXYGÈNE RÉALISÉS PAR GOSSELIN (2007)**

Échantillons	C _p	D _H	n	S _r	K _r Collin (/an)	K _r Pollute (/an)	K _r Vadose/W (/an)
Buly 1	0,12	6,87×10 ⁻⁶	0,19	1	1341	617	621
Buly 2	0,12	6,87×10 ⁻⁶	0,46	0,87	894	46	47
Buly 3	0,12	6,87×10 ⁻⁶	0,35	0,93	1076	177	219
Buly 6	0,12	6,87×10 ⁻⁶	0,43	0,88	944	78	69
Buly 7	0,12	6,87×10 ⁻⁶	0,4	0,92	993	77	80
Buly 8	0,12	6,87×10 ⁻⁶	0,48	0,32	861	1250	1461
Buly 9	0,12	6,87×10 ⁻⁶	0,5	0,17	828	695	694
Buly 10	0,12	6,87×10 ⁻⁶	0,5	0,24	828	1170	1278
Buly 11	0,12	6,87×10 ⁻⁶	0,42	0,93	960	67	62
Buly 12	0,12	6,87×10 ⁻⁶	0,74	1,06	431	71	91
Buly 13	0,12	6,87×10 ⁻⁶	0,42	0,93	960	26	26
Louvicourt S3-1	0,38	5,23×10 ⁻⁶	0,58	0,01	2891	182	183
Louvicourt S3-2	0,38	5,23×10 ⁻⁶	0,57	0,08	2960	2670	2670
Louvicourt S3-3	0,38	5,23×10 ⁻⁶	0,58	0,19	2891	4780	4780
Louvicourt S3-4	0,38	5,23×10 ⁻⁶	0,57	0,31	2960	4830	4820
Louvicourt S3-5	0,38	5,23×10 ⁻⁶	0,5	0,57	3442	5400	5410
Louvicourt S3-6	0,38	5,23×10 ⁻⁶	0,42	0,97	3992	1480	1100
Louvicourt S3-7	0,38	5,23×10 ⁻⁶	0,44	0,7	3855	4230	4240
Louvicourt S3-8	0,38	5,23×10 ⁻⁶	0,38	0,96	4268	843	844
Louvicourt S3-9	0,38	5,23×10 ⁻⁶	0,39	0,97	4199	1740	1100
MNO3	0,12	1,29×10 ⁻⁵	0,43	0,68	499	251	256
MNO5	0,12	1,29×10 ⁻⁵	0,66	0,4	298	122	128
MNO12	0,12	1,29×10 ⁻⁵	0,44	0,62	490	311	310
MO1	0,005	1,28×10 ⁻⁵	0,48	0,42	18	26	26
MO2	0,005	1,28×10 ⁻⁵	0,44	0,63	20	24	24
SNO1	0,02	1,29×10 ⁻⁵	0,37	0,47	77	231	233
SNO3	0,02	1,29×10 ⁻⁵	0,35	0,71	80	110	110
SNO4	0,02	1,29×10 ⁻⁵	0,33	0,82	82	92	91
SO1	0,04	9,58×10 ⁻⁶	0,5	0,35	199	202	201
SO2	0,04	9,58×10 ⁻⁶	0,35	0,55	259	73	73
SO3	0,04	9,58×10 ⁻⁶	0,4	0,64	239	236	237
SO4	0,04	9,58×10 ⁻⁶	0,34	0,91	263	37	37
SO5	0,04	9,58×10 ⁻⁶	0,4	0,94	239	182	183